



XA0201153

- 97 -

ЗАЩИТА БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
ОТ ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
ГОРЯЩЕГО НАТРИЯ

Грачёв Н.С., Дробышев А.В., Жирова Р.И.

СССР

Совещание специалистов МАГАТЭ

"Натриевые пожары"

1988 г.

А Н Н О Т А Ц И Я

В докладе приводятся расчетно-экспериментальные исследования по изучению защиты бетонных конструкций от воздействия горящего щелочного металла.

Приведены результаты экспериментальных исследований по защите строительных конструкций при горении излившегося натрия при высокой температуре, а также дано сравнение расчетных исследований температурных полей в бетоне и в вермикулите с экспериментальными данными.

Натрий довольно широко применяется в качестве теплоносителя в различных энергетических установках. Он обладает достаточно хорошими физическими и теплофизическими свойствами, позволяющими осуществлять интенсивный теплообмен в различных теплообменных аппаратах. Вместе с тем, натрий характеризуется и существенными недостатками. Он обладает высокой химической активностью, благодаря которой он реагирует со многими химическими элементами и соединениями. При его горении выделяется большое количество тепла, что приводит к росту температуры и давления в помещениях. Горящий натрий вступает в химическое взаимодействие с бетоном и большинством других строительных материалов, обезвоживая и разрушая их. Одним из наиболее критических эффектов является выделение водорода в результате химического взаимодействия с водой.

Данная работа посвящена расчетно-экспериментальным исследованиям по изучению защиты бетонных конструкций от воздействия горящего натрия с помощью облицовки их листовой сталью с теплоизоляционным слоем вермикулита. Проведены расчеты температурных полей в бетоне и теплоизоляции из вермикулита различной толщины в зависимости от времени горения металла. Получено вполне удовлетворительное совпадение расчетов с экспериментом.

#### РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В БЕТОНЕ И В ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ

Рассматривается одномерная задача распространения тепла в твердом теле в направлении нормали к горячей поверхности в отсутствии источников тепла в самом теле с граничными условиями первого рода — постоянной температурой горячей поверхности  $T_c = 650^\circ\text{C}$  и начальной температурой тела  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ .

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (I)$$

$$T(x, 0) = T_0, \quad (2)$$

$$T(0, t) = T_c. \quad (3)$$

Решение уравнения (1) для нулевого начального условия  $T(x, 0) = 0$  выражается зависимостью

$$T(x, t) = T_c \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{at}} \right) \right], \quad (4)$$

где 
$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-d^2} dd.$$

С учетом условия (2) решение принимает вид

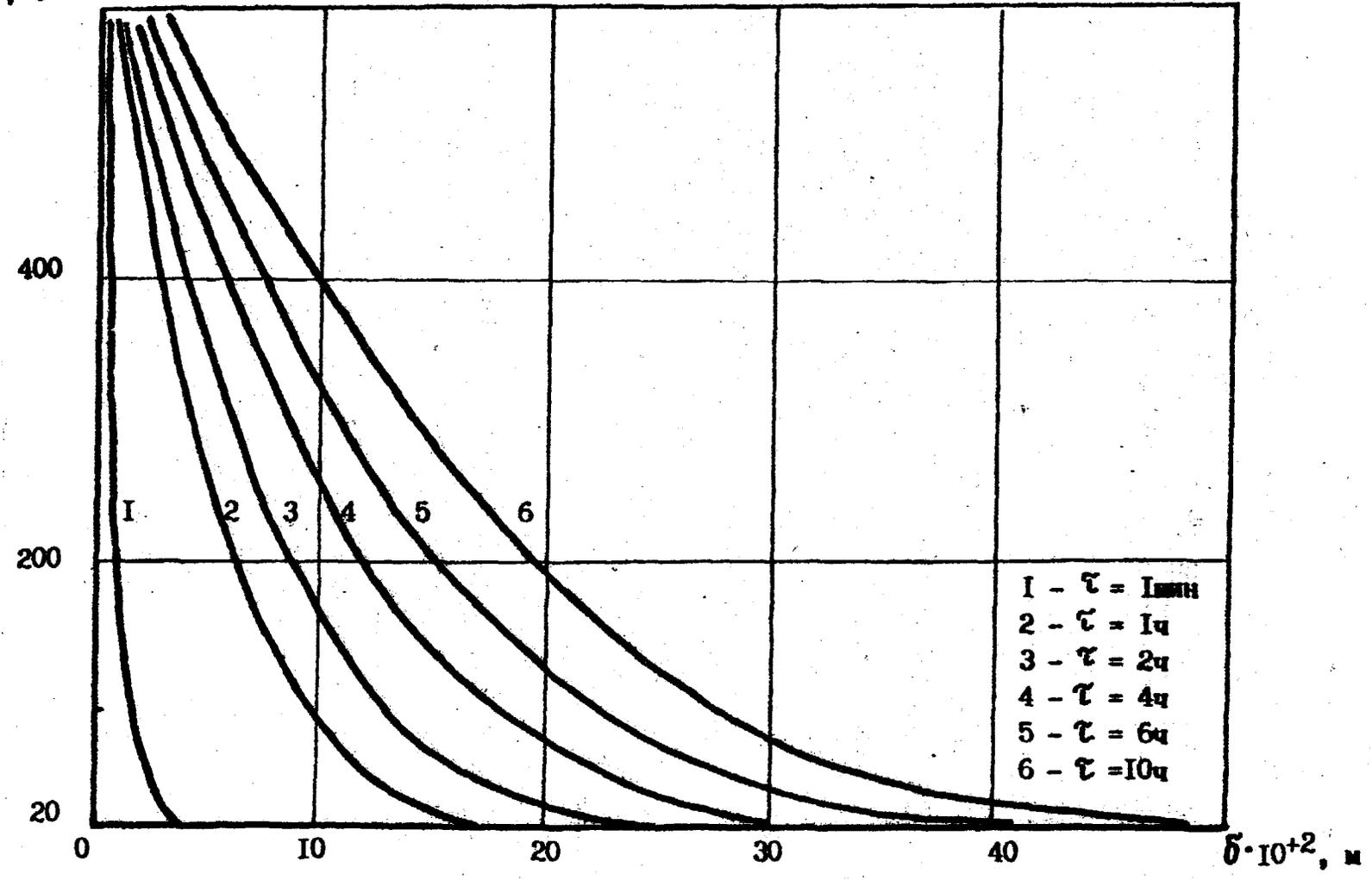
$$T(x, t) = T_c - (T_c - T_0) \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{at}} \right). \quad (5)$$

Расчеты по уравнению (5) выполнялись на ЭВМ ЕС 1022.

Интегрирование с заданной точностью проводилось по методу Симпсона. Значения коэффициента теплопроводности для бетона и для вермикулита принимались равными  $6,76 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$  и  $4,51 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$  соответственно.

Результаты расчетных значений профилей температур в бетоне и в вермикулите приведены на рис. 1 и 2. Расчеты показывают, что толщина теплоизоляции из вермикулита в 200 мм предохраняет бетон от нагрева до  $80 - 100^\circ\text{C}$  в течение около 5 ч горения натрия на металлооблицовке. Для бетона температура  $100^\circ\text{C}$  считается предельно допустимой выше этого предела происходит снижение его прочности и происходят другие нежелательные изменения физико-химических свойств. Толщина вермикулита в 250 мм является эффективной тепловой защитой для бетона на период до 8 ч горения натрия, а толщина в 300 мм предохраняет бетон, приблизительно, в течение 10-11 ч.

$T^{\circ}, C$



- 100 -

Рис. I. Температурное поле в бетоне

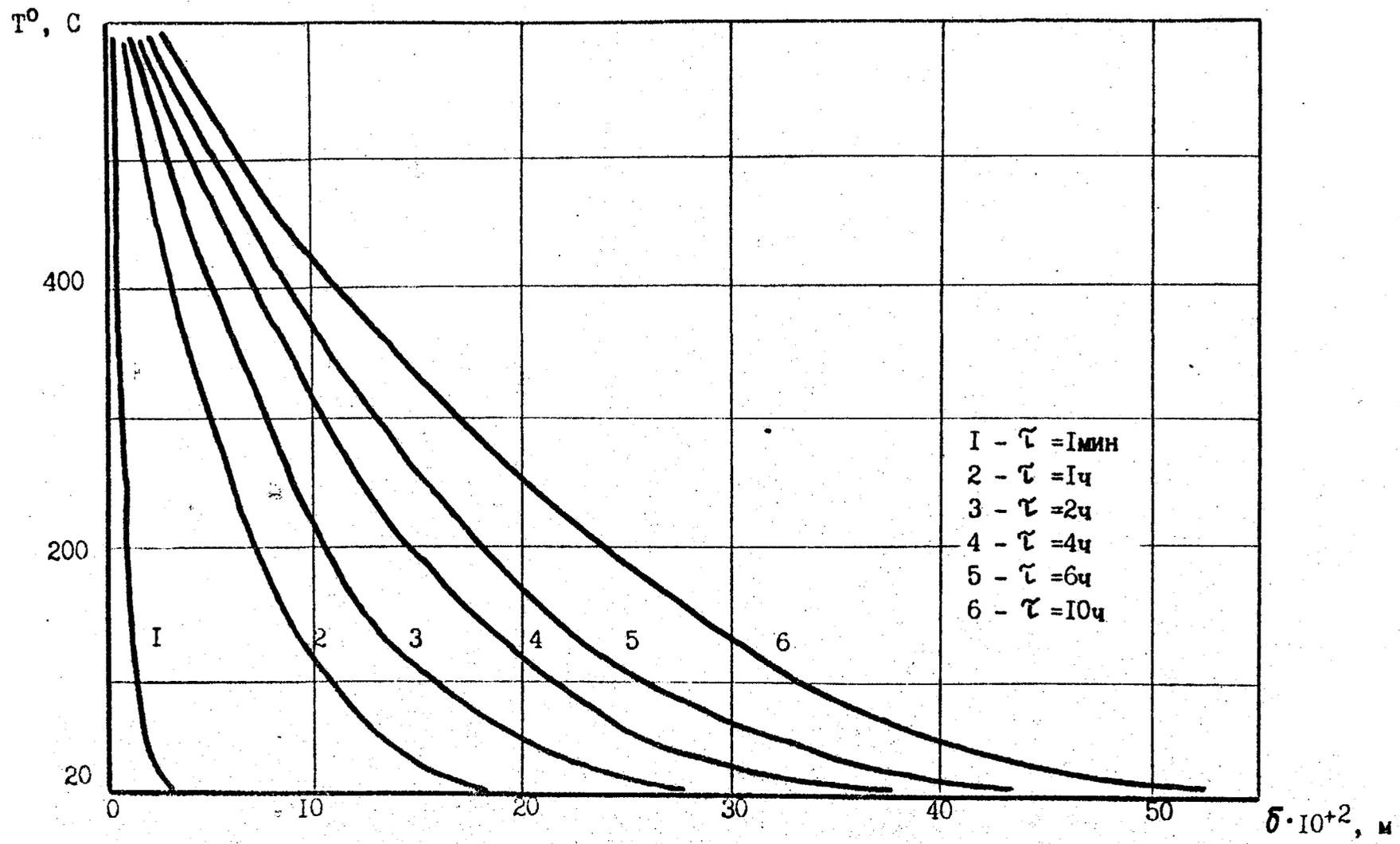


Рис.2. Температурное поле в тепловой изоляции ( вермикулит )

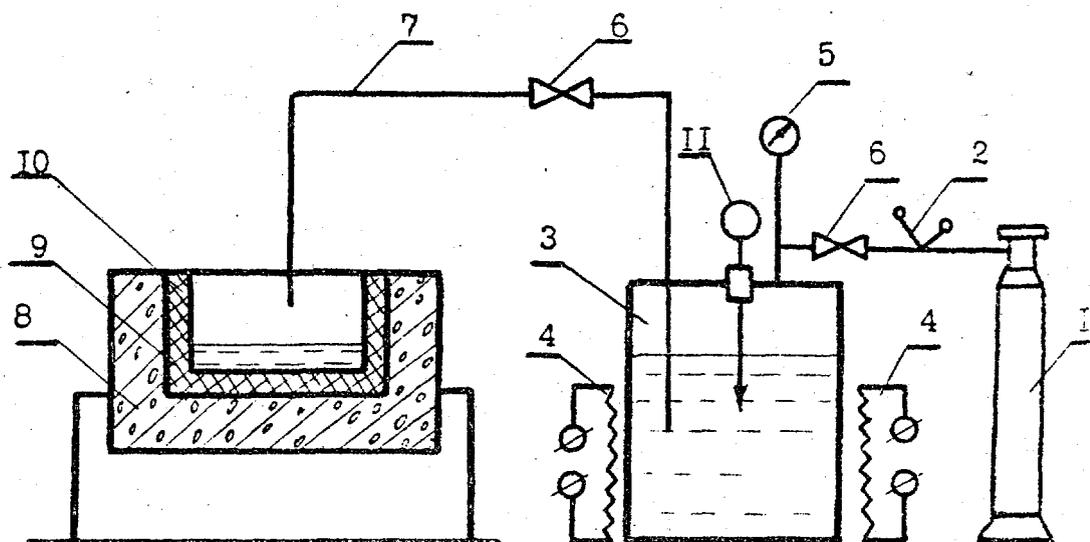
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПО ЗАЩИТЕ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГОРЯЩЕГО НАТРИЯ

В экспериментах исследовалась защита бетонных горизонтальных поверхностей, вертикальных стен и мест стыковки пола со стеной. Схема установки представлена на рис. 3. Излив натрия осуществлялся из бака 3 по линии 7, на которой установлен жидкометаллический вентиль 6 (Ду = 25 мм). Обогрев бака осуществлялся нихромовым нагревателем 4 в фарфоровых бусах, который был запитан от разделительного трансформатора. Передавливание натрия производилось подачей в бак 3 аргона из баллона I через редуктор 2 и газовый вентиль 6. Для передавливания разогретого металла в бак подавалось избыточное давление 0,05 МПа.

Первые два опыта проводились с конструкцией бетонного блока, представленной на рис. 4. Опыт проводился на открытом воздухе под навесом. Излив натрия осуществлялся в поддон размером 1900x590x200 мм, изготовленный из нержавеющей стали IX18Ni10T толщиной 5 мм. Бетонный блок от поддона был защищен слоем теплоизоляционного материала, в качестве которого был принят вермикулит. Слой вермикулита между дном поддона и бетонным блоком составлял 200 мм, боковые поверхности защищены слоем вермикулита по 100 мм.

Схема расположения термопар в вермикулите и слое натрия представлена на рис. 5. Распределение температур в слое натрия измерялось с помощью хромель-алюмелевых термопар №1,3,4,5,6, изготовленных из термопарного кабеля КТМС наружным диаметром 1 мм. Термопары устанавливались с шагом 8 мм.

Распределение температур в вермикулите измерялось с помощью термопар №7,8,9,10,11,12, изготовленных из хромель-капельной проволоки диаметром 0,5 мм, покрытой стеклонитью. Расстояние между термопарами указано на рис. 5. Запись температур осуществлялась потенциометром КСП-2.



- |                         |                          |
|-------------------------|--------------------------|
| I - баллон с аргоном,   | 7 - трубопровод,         |
| 2 - редуктор,           | 8 - бетонный блок,       |
| 3 - бак с металлом,     | 9 - засыпка вермикулита, |
| 4 - электронагреватель, | 10 - поддон,             |
| 5 - манометр,           | II - уровнемер           |
| 6 - газовые вентили,    |                          |

Рис.3. Схема установки

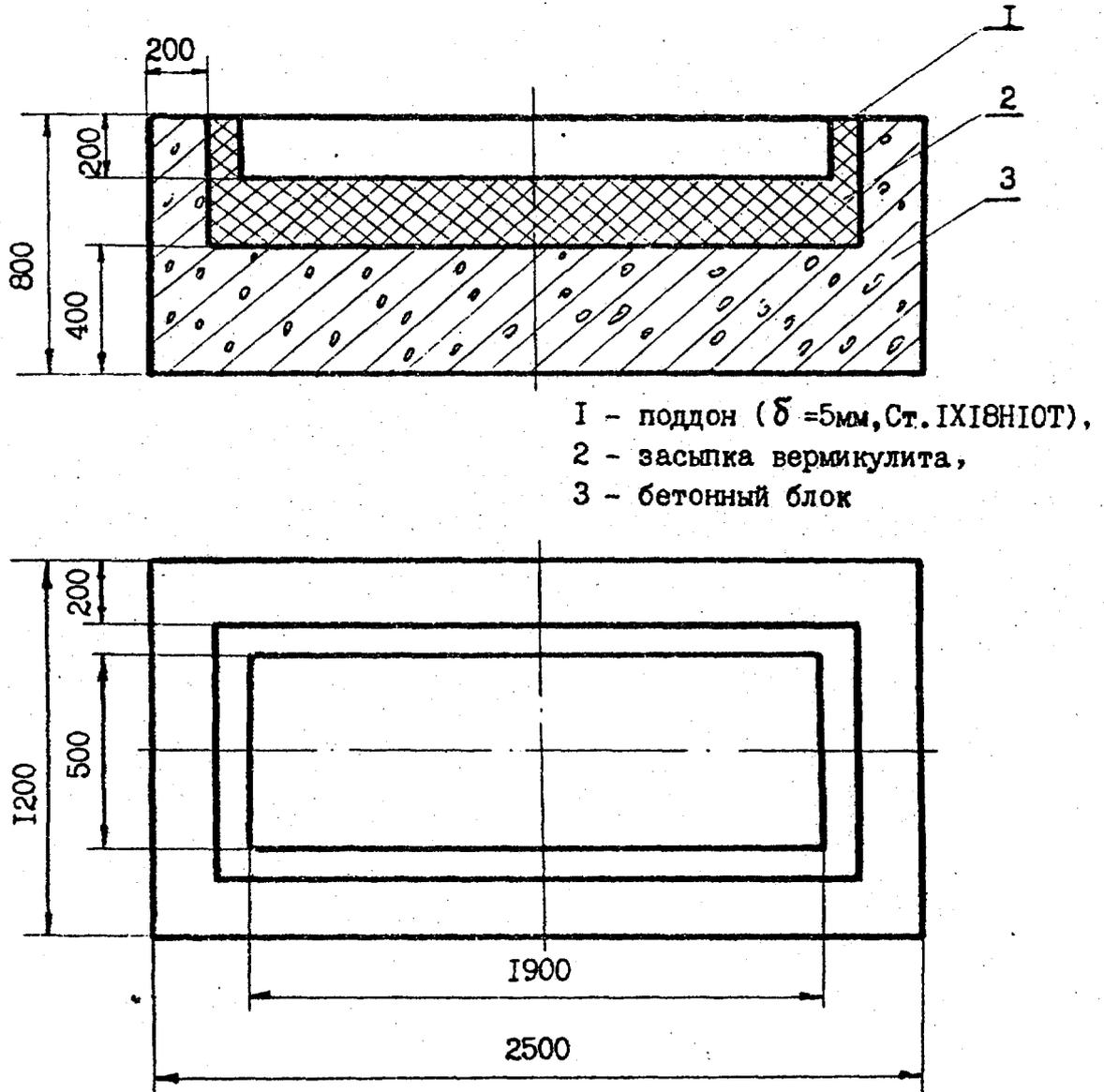
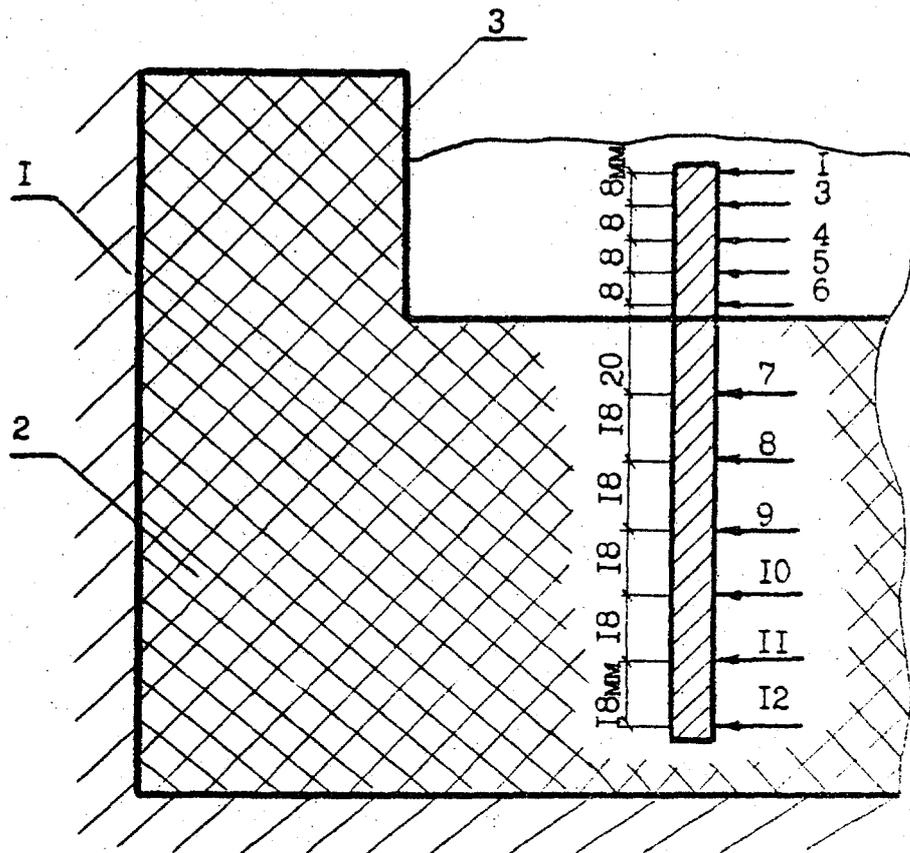


Рис.4. Конструкция бетонного блока с поддоном



I - бетон, 2 - вермикулит, 3 - поддон с натрием

Рис.5. Схема расположения термопар в бетонном блоке

Опыт №3 проводился в боксе уничтожения отходов щелочных металлов объемом  $250 \text{ м}^3$  со степенью герметичности  $\sim 0,3$  объема/ч . Горение натрия в этом эксперименте происходило в металлическом поддоне размером  $1000 \times 500 \times 250$  мм, изготовленном из листовой стали 3 толщиной 2 мм . Под поддоном располагалась подушка из вермикулита толщиной 100 мм . С одной стороны боковая поверхность поддона ( $500 \times 250$  мм) соприкасалась с бетонной стеной бокса, облицованной листом из нержавеющей стали толщиной 5 мм. Вторая боковая поверхность поддона ( $500 \times 250$  мм) соприкасалась с незащищенной бетонной плитой. Третья боковая поверхность поддона ( $1000 \times 250$  мм) соприкасалась со стеной бокса, облицованной листом из нержавеющей стали толщиной 5 мм, которая была дополнительно защищена слоем вермикулита 100 мм и дополнительным листом из Ст.3 толщиной 2 мм .

Схема расположения поддона и термопарных зондов для измерения температурных полей по высоте бетонных стенок бокса и бетонной плиты, также в натрии показана на рис. 6 . Термозонды I, II, III, включающие в себя хромель-алюмелевые термопары из проволоки диаметром 0,5 мм в стеклонити по 8 штук в каждом, с I по 8, с 9 по 16, с 17 по 24, соответственно, расположены в незащищенном бетонном блоке, в бетонной стене, облицованной нержавеющей листом толщиной 5 мм, и в бетонной стене, облицованной таким же нержавеющей листом и дополнительно защищенной слоем вермикулита толщиной 100 мм .

Термозонд IV с термопарами с 25 по 37 установлен в центре поддона и предназначен для измерения профиля температур в слое горящего натрия ( термопары №25, 26, 27, 28, 29, изготовленные из термопарного кабеля КТМС диаметром 1,5 мм ) и температуры воздуха под слоем горящего металла ( термопары с 30 по 37, изготовленные из хромель-алюмелевой проволоки диаметром 0,5 мм в стеклонити ) .

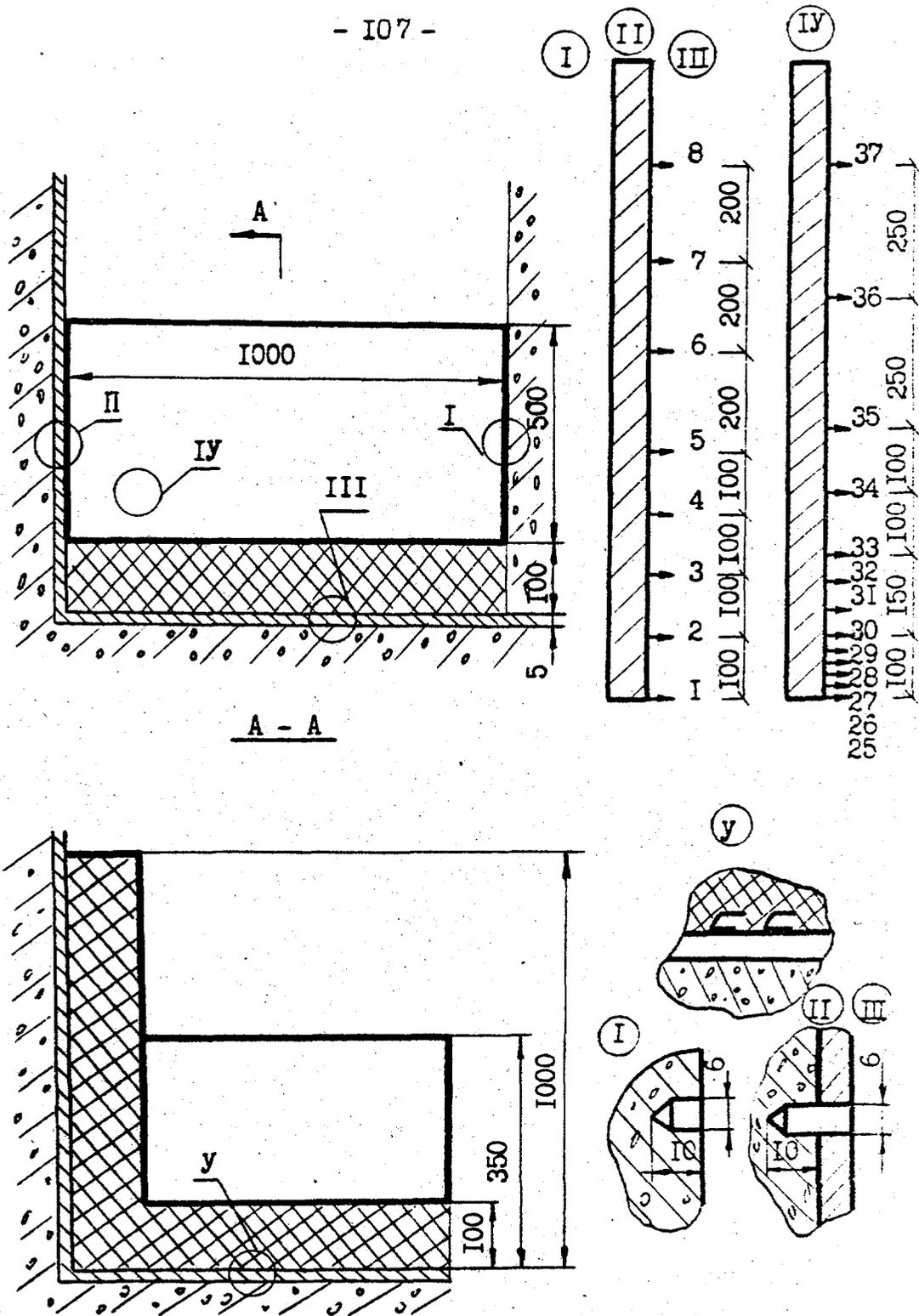


Рис.6. Схема расположения поддона и термопарных зондов в опыте №3

С помощью термозонда У (термопары с 38 по 42 из хромель-алюмелевой проволоки диаметром 0,5 мм в стеклонити) измерялась температура под поддоном через слой вермикулита толщиной 100 мм .

Термопара 43 измеряла температуру холодных слоев. Все 43 термопары подключены на систему обтекающего контроля ИС-200 с цифрозаписью на МП-16. Скорость записи 2 точки в секунду. Заделка термопар в бетонных стенках показана на рис. 6 .

В опыте №1 в поддон было излито ~ 55 кг натрия при температуре 450°C. Горение продолжалось в течение 130 мин. График изменения температур в натрии и в вермикулите с течением времени представлен на рис. 7 . Максимально зафиксированная температура в натрии составляла 720°C. Температура в слое вермикулита на расстоянии 110 мм от дна поддона через 130 мин. после начала горения натрия достигла 145°C.

В опыте №2 в поддон было излито ~ 42 кг натрия при температуре 450°C. Горение продолжалось в течение 80 мин. График изменения температур представлен на рис. 8. Максимально зафиксированная температура в горящем натрии составляла 1000°C, а температура в вермикулите на расстоянии 110 мм от дна поддона спустя 80 мин. после начала горения достигла 130°C.

В опыте №3 в поддон было излито ~ 55 л натрия при температуре 400°C. Время горения составляло 90 мин. Запись температур производилась с интервалом 5 мин. Графики распределения температур в незащищенном бетонном блоке, в бетонной стене, облицованной нержавеющей листом толщиной 5 мм, и в бетонной стенке, облицованной нержавеющей листом толщиной 5 мм с дополнительным защитным слоем вермикулита толщиной 100 мм, приведены соответственно на рис. 9, 10, 11 .

На рис. 12 представлено распределение температур в натрии и температуры воздуха над поддоном с горящим натрием.

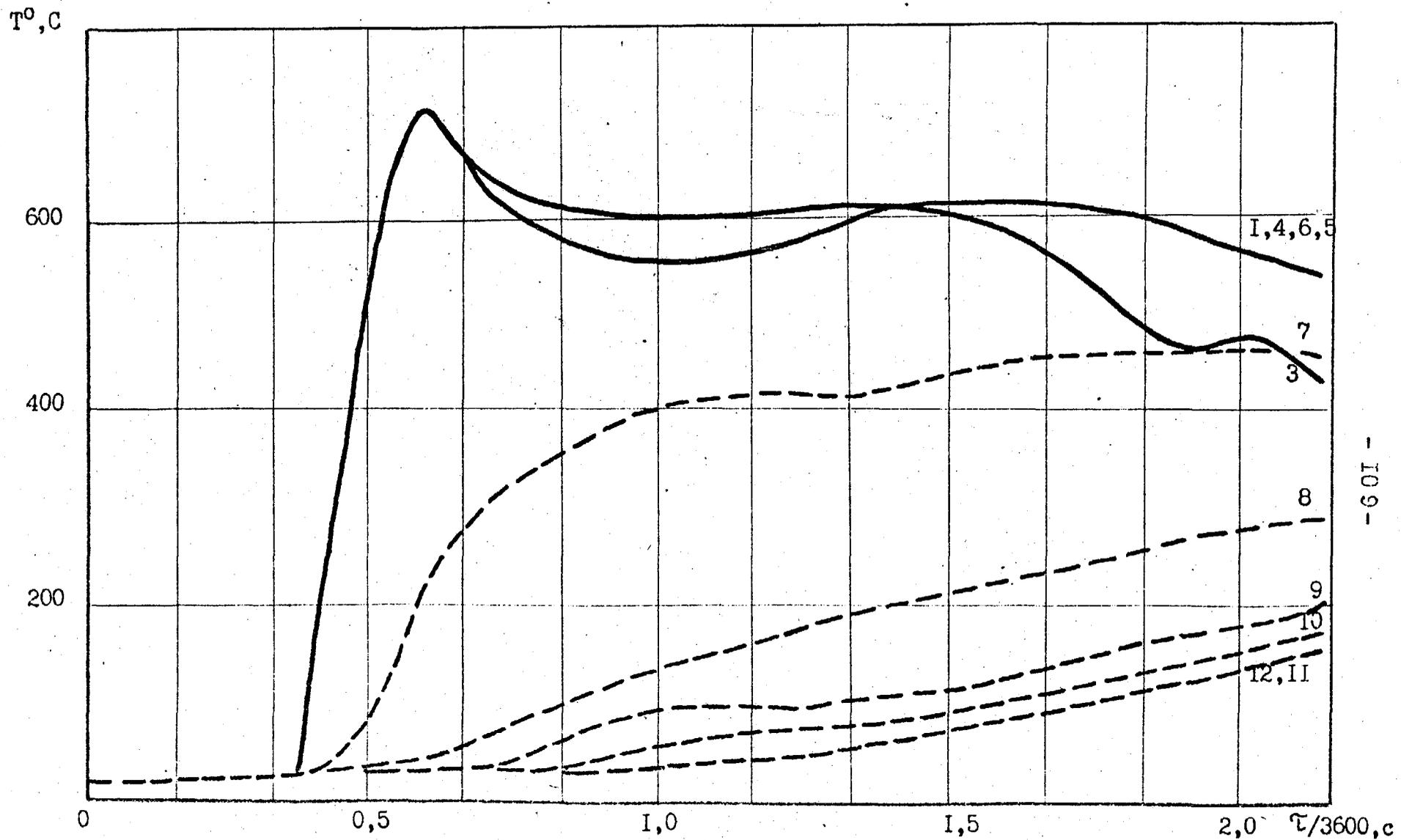


Рис.7. Изменение температуры в зависимости от времени:

1,4,3,5,6 - в натрии, 7,8,9,10,11,12 - в вермикулите

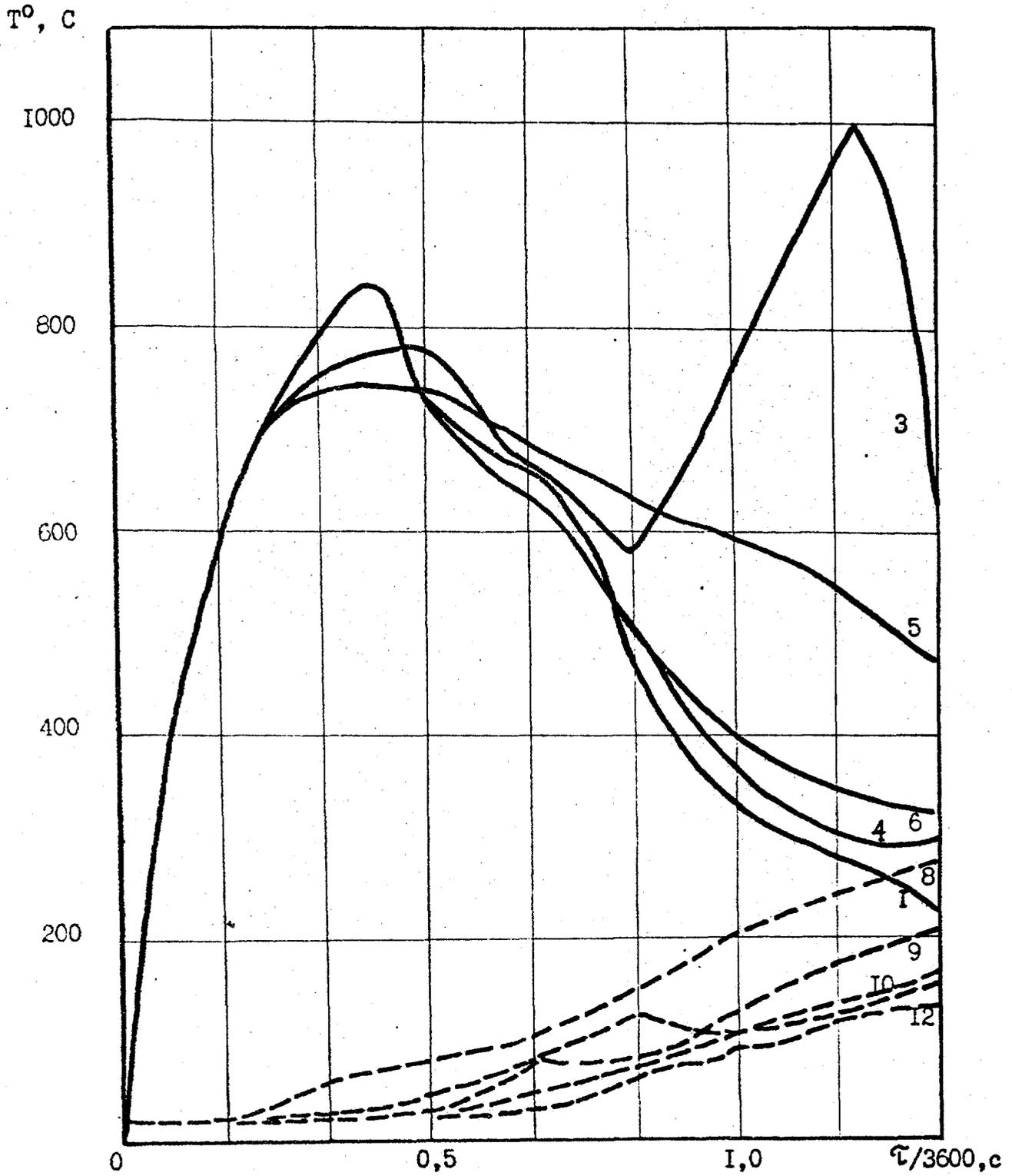


Рис. 8. Изменение температуры в зависимости от времени:

1, 3, 4, 5, 6 - по высоте слоя излившегося натрия;

8, 9, 10, 11, 12 - по высоте слоя вермикулита

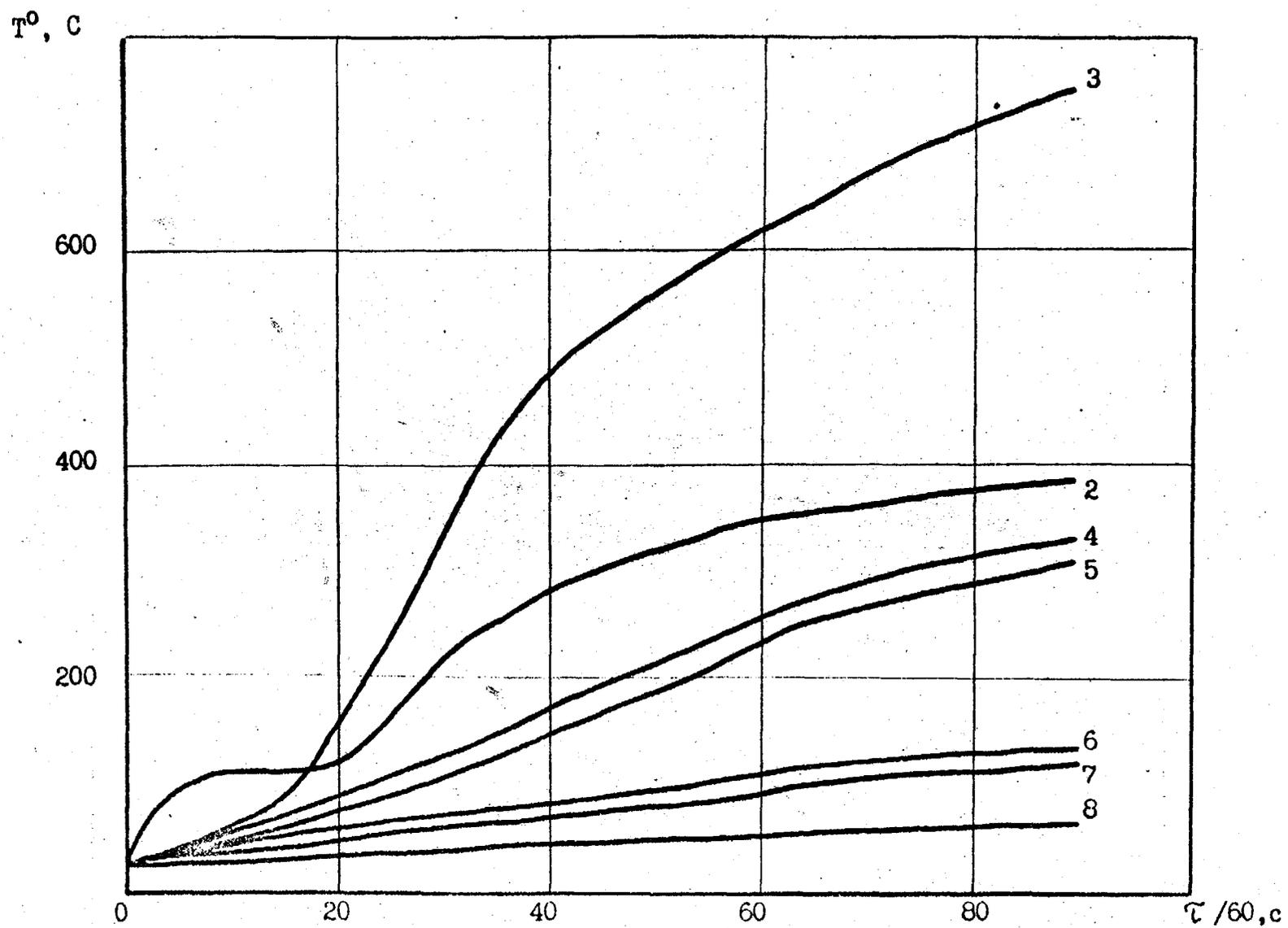


Рис.9. Распределение температур в незащищенном бетонном блоке

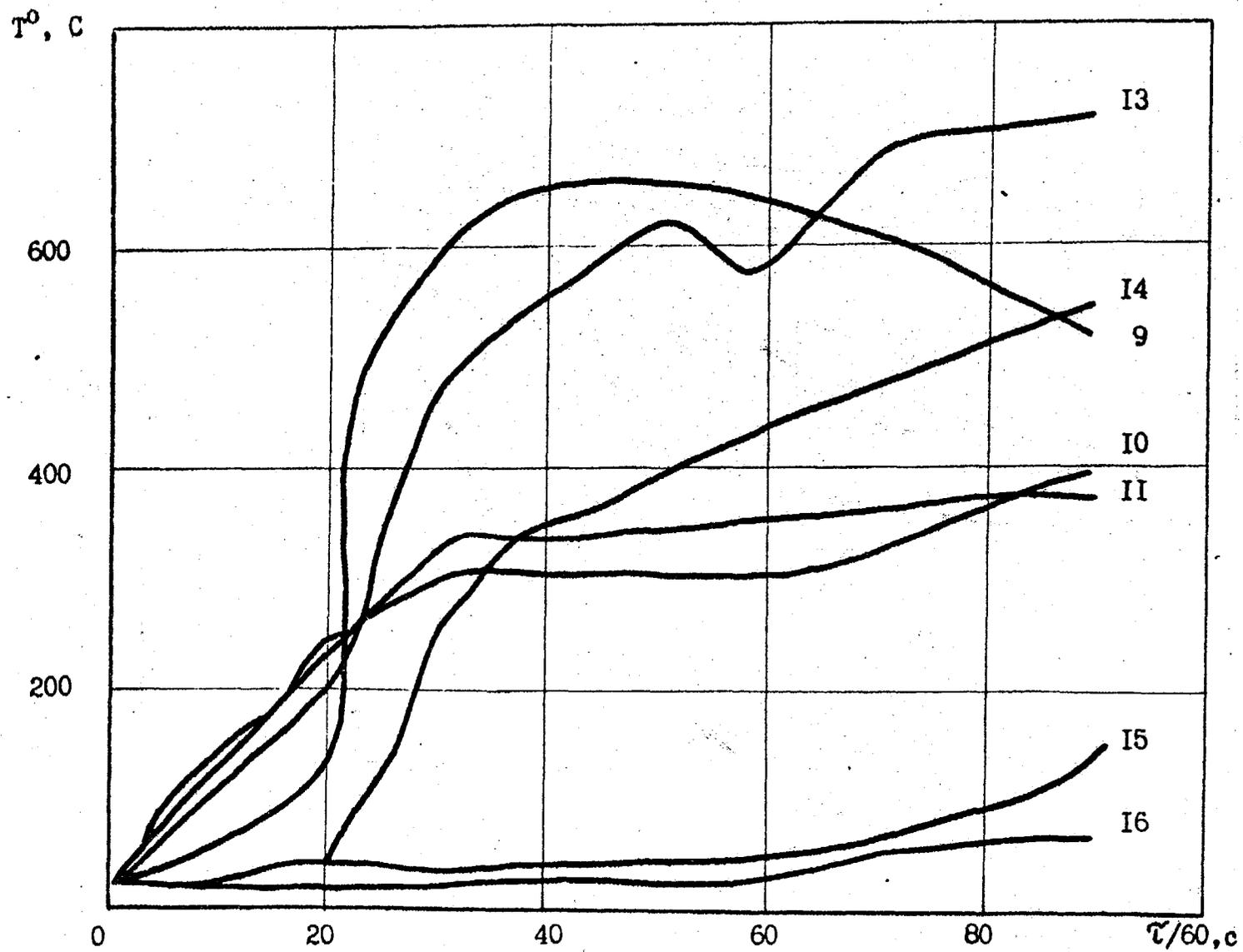


Рис. 10. Распределение температур в бетонной стене, облицованной нержавеющей листом  $\delta = 5\text{ мм}$

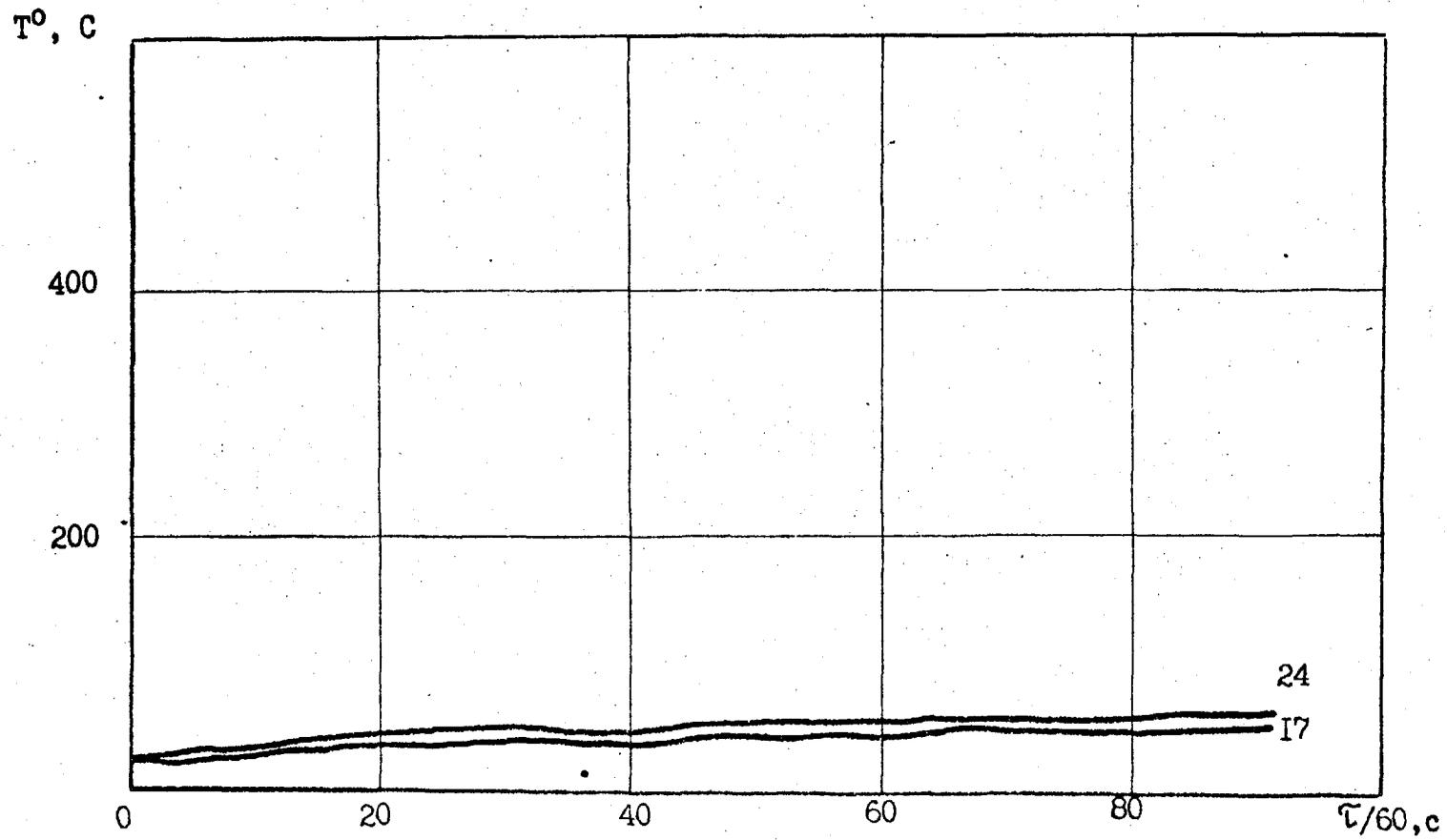


Рис. II. Распределение температур в бетонной стене, облицованной нержавеющей листом  $\delta = 5$  мм и дополнительным защитным слоем вермикулита  $\delta = 100$  мм

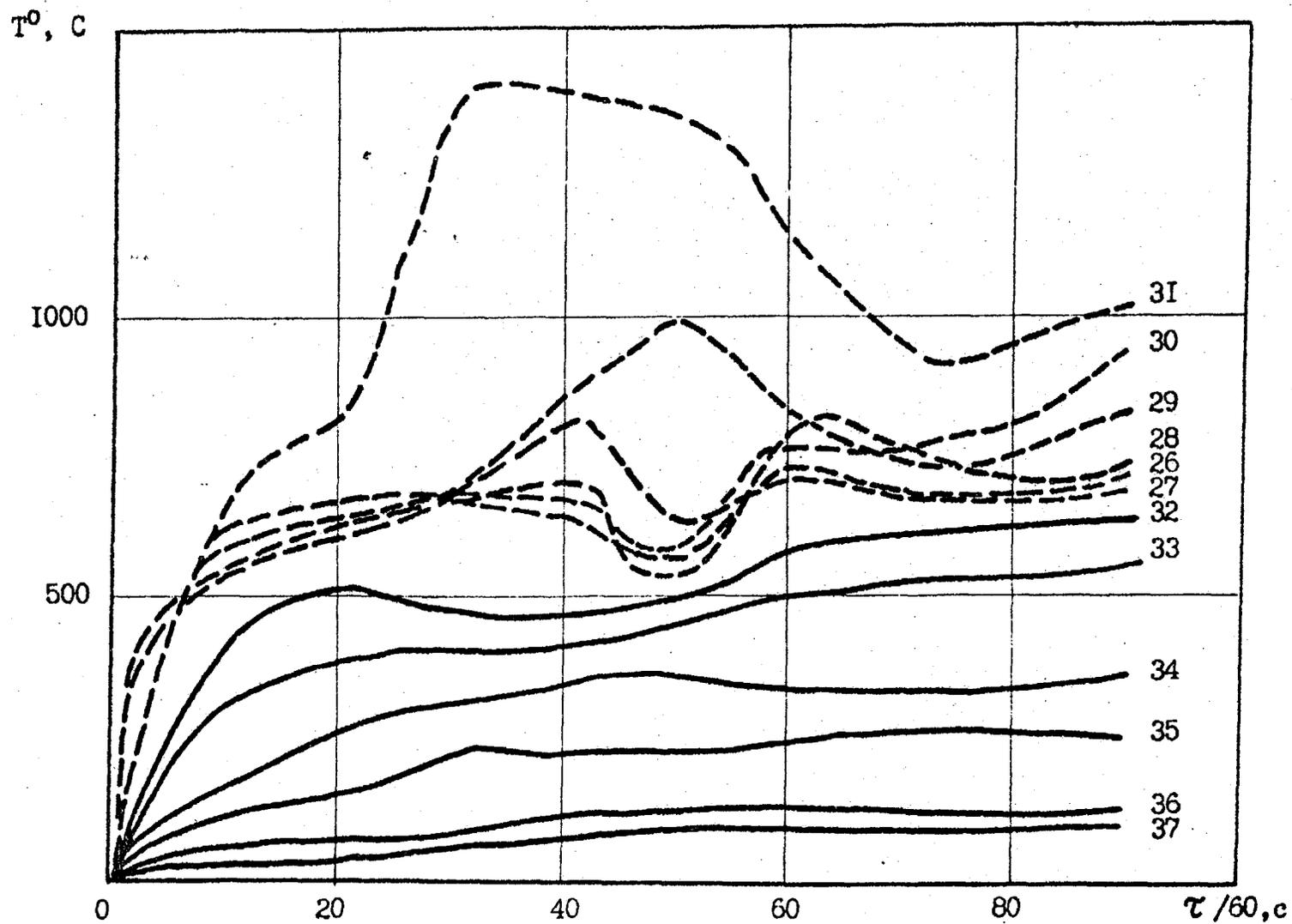


Рис.12. Распределение температур в слое натрия и над поверхностью горения

На рис. 13 приводится конечный график распределения температур по высоте во всех исследуемых фрагментах через 1,5 с после начала горения. Заштрихованная область I соответствует слою вермикулита толщиной 100 мм, расположенного под поддоном с горящим натрием. Заштрихованная область II изображает первоначальную высоту излитого натрия, которая составляла ~ 110 мм. Температура на дне поддона с горящим натрием достигла  $640^{\circ}\text{C}$ , температура на поверхности натрия -  $820^{\circ}\text{C}$ , максимальная зафиксированная температура в горячей паровой фазе натрия достигала  $1340^{\circ}\text{C}$ . Конечная температура на уровне горящего натрия в незащищенной бетонной стенке, соприкасающейся со стенкой поддона, составляла  $\sim 740^{\circ}\text{C}$ ; в стенке, облицованной нержавеющей листом толщиной 5 мм, -  $370^{\circ}\text{C}$ ; в стенке, облицованной нержавеющей листом с защитным слоем вермикулита толщиной 100 мм, не более  $50^{\circ}\text{C}$ .

Сопоставление опытных данных по изменению температуры в зависимости от времени в слое вермикулита толщиной 100 мм с расчетом представлено на рис. 14.

Как видно из рисунка, получено удовлетворительное согласование расчетных данных с экспериментом. Помещение, в котором проводились эксперименты, представляет достаточно герметичный объем, что позволило провести измерения возрастания давления в боксе за счет нагрева воздуха. Было отмечено, что максимальный подъем температуры происходит после 20 мин. горения теплоносителя и по абсолютному значению не превысил  $11^{\circ}\text{C}$ , то есть температура поднялась с  $26^{\circ}\text{C}$  до  $37^{\circ}\text{C}$ . Перепад давлений между боксом и операторской составил 4 мм водяного столба. При этом через негерметичности бокса в помещении операторской (смотровое окно, уплотнение манипулятора) стал поступать дым аэрозоли натрия. Для интенсификации горения в процессе эксперимента была включена система очистки воздуха в режиме рециркуляции с частичным ( $\sim 5 - 10\%$ ) выбросом за пределы бокса. При этом давление воздуха в боксе упало и стало меньше на 4 мм водяного столба по отношению к операторской. Выход аэрозолей через негерметичности бокса прекратился.

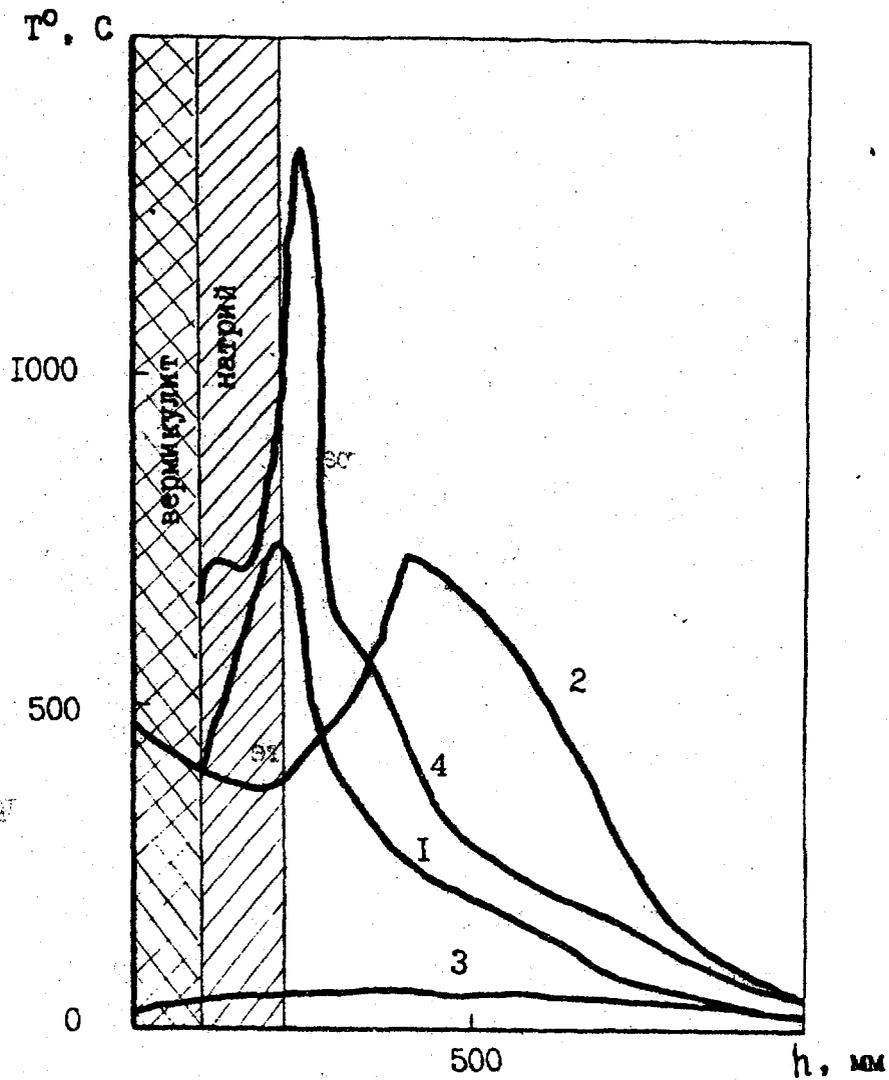


Рис. 13. Распределение температур по высоте через 1,5 часа от начала горения натрия:  
1 - в незащищенной бетонной стене;  
2 - в бетонной стене, защищенной листом  $\delta = 5$  мм из нержавеющей стали;  
3 - в бетонной стене, защищенной листом  $\delta = 5$  мм из нержавеющей стали и слоем вермикулита  $\delta = 100$  мм;  
4 - в слое горящего натрия и над поверхностью горения

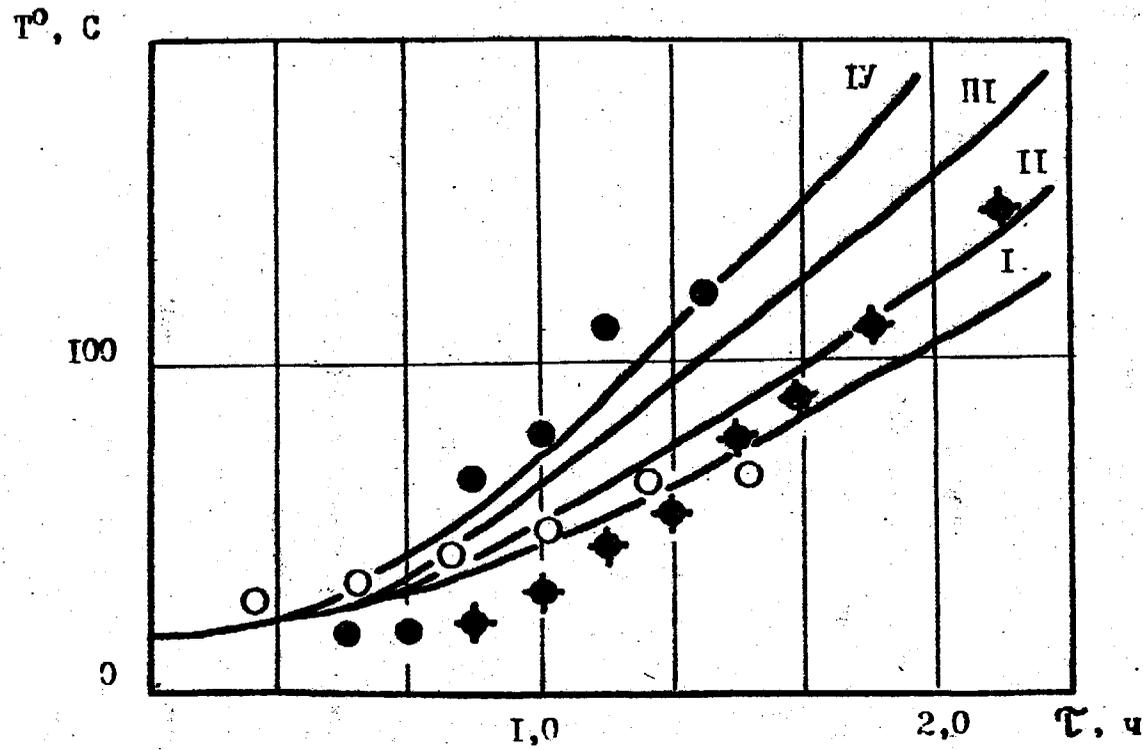


Рис. 14. Изменение температуры в зависимости от времени  
 в слое вермикулита толщиной  $\delta = 0,11$  м:  
 I - 500°C, II - 650°C, III - 800°C, IV - 1000°C

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные расчетно-экспериментальные исследования по изучению защиты бетонных конструкций от воздействия горячего натрия позволяют сделать следующие выводы:

1. Температура натрия на поверхности горения составляет  $750-850^{\circ}\text{C}$  на дне поддона -  $640^{\circ}\text{C}$ , в горячей паровой фазе - до  $1100^{\circ}\text{C}$ . При включении вентиляции максимальная температура в паровой фазе достигала  $1340^{\circ}\text{C}$ . Температура воздуха над поверхностью горения натрия на высоте 900 мм в условиях опыта достигала  $80^{\circ}\text{C}$ .

2. Исследовано распределение температур по высоте бетонных стен, соприкасающихся с боковыми поверхностями металлического поддона, в котором происходило горение натрия. Спустя 90 мин после начала горения металла температура в области соприкосновения горячего слоя натрия достигает:

- в незащищенной бетонной стене  $\sim 740^{\circ}\text{C}$ ;
- в бетонной стене, облицованной нержавеющей листом толщиной 5 мм,  $\sim 370^{\circ}\text{C}$ ;
- в бетонной стене, облицованной нержавеющей листом толщиной 5 мм и защитным слоем вермикулита толщиной 100 мм - не более  $50^{\circ}\text{C}$ .

3. Облицовку стен металлическими листами с теплоизоляционным слоем из вермикулита рекомендуется проводить на высоту порядка 1 м от поверхности горения.

4. Получено удовлетворительное совпадение экспериментальных данных полей температур в бетоне и в вермикулите с расчетами по уравнению теплопроводности с однородными начальными и граничными условиями первого рода.

5. Показано, что защита бетонных конструкций с помощью облицовки их металлическими листами с промежуточным изоляционным слоем из вермикулита является достаточно эффективной.