

П2  
И74

архив

Центральный научно-исследовательский институт  
противопожарной обороны

---

# ИНФОРМАЦИОННЫЙ СБОРНИК

ВОПРОСЫ ПОЖАРОТУШЕНИЯ И ПОЖАРНОЙ  
ПРОФИЛАКТИКИ

---

МОСКВА — 1959 г.

ЧИТАЛЬНЫЙ ЗАЛ

Рассылается по списку

# ИНФОРМАЦИОННЫЙ СБОРНИК

ВОПРОСЫ ПОЖАРОТУШЕНИЯ И ПОЖАРНОЙ  
ПРОФИЛАКТИКИ



МОСКВА — 1959 г.

ЧИТАЛЬНЫЙ ЗАЛ



К. Т. Н. ТАУБКИН С. И.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ЗАГОРАНИЯ ХЛОПКА-ВОЛОКНА ПРИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗКАХ

Пожары, возникающие при перевозке хлопка-волокна по железным дорогам, приносят большой ущерб.

Так, например, убытки от пожаров хлопка в США, при его перевозке по железной дороге, достигли в 1954 г. почти 2 миллиона долларов. Эта сумма составляет 16% убытков от всех пожаров, происшедших в стране в течение года (1).

Вопрос о причинах загорания хлопка-волокна при железнодорожных перевозках дебатировался давно. Еще в 30 годах он подвергался детальному обсуждению. Однако никаких выводов не было сделано (2). В дальнейшем этот вопрос неоднократно поднимался, но экспериментальному исследованию подвергнут не был.

В связи с настоятельными запросами, поступавшими от заинтересованных ведомств, соответствующая работа была проведена ЦНИИПО и НИИ МПС в 1957 г. (3). В работе участвовали инженеры В. К. Волкова, Н. С. Никитина, А. Н. Баратов, А. В. Панин и лаборанты А. Прошина и А. И. Прошин.

Исходя из пожароопасных свойств хлопка-волокна, в качестве возможных причин его загорания в работе рассматривались:

1. искра паровоза;
2. трение обвязочной проволоки;
3. самовозгорание волокна в результате его промасливания;
4. возгорание волокна в результате внесения тлеющего очага в кипу в процессе первичной обработки хлопка-сырца.

### 1. Искра паровоза

Работами ЦНИИПО (4) установлено, что возгорание хлопка-волокна происходит сравнительно легко и быстро с поверхности, при соприкосновении с ней открытого пламени или нагретых тел, имеющих температуру выше  $210^{\circ}\text{C}$ .

В связи с этим никаких сомнений не вызывает возможность проникновения пожаров кип хлопка-волокна от действия горячей угольной частицы (искра от паровоза), имеющей температуру свыше  $500^{\circ}\text{C}$  и достаточный тепловой импульс для поджигания более трудновозгораемых материалов, нежели хлопковое волокно.

## **2. Возгорание от трения**

В периодической литературе (1), (5) имеются указания о возможности загорания хлопка-волокна при трении обвязочной проволоки, а также кип о древесину вагона. Однако экспериментальных данных в них не приводится.

Материалы, имеющиеся в распоряжении МПС СССР, страдают неполнотою анализа случаев пожаров кип волокна.

Поэтому для выяснения возможности загорания кип волокна от трения требовалась экспериментальная проверка.

## **3. Самовозгорание волокна**

Самовозгорание волокна в результате его промасливания может наблюдаться лишь при содержании самоокисляющихся масел не менее 3—5% от веса волокна (6).

По данным ЦНИИХПром в товарном хлопке-волокне хлопкового масла (относится к самоокисляющимся маслам) практически не содержится.

Поэтому самовозгорание промасленного волокна не может рассматриваться, как возможная причина загорания кип волокна при их транспортировке.

## **4. Возгорание волокна от технологических причин**

На хлопкозаводах наблюдались случаи загорания волокна в процессе первичной обработки хлопка-сырца от попадания в оборудование посторонних твердых предметов (болты, гайки, галька).

Непрерывность процесса первичной обработки хлопка-сырца с выпуском кипы волокна примерно через каждые 3 мин. может способствовать проникновению тлеющей массы к прессу и даже ее запрессовке, что и наблюдается на практике. Однако горение волокна при пневматической транспортировке его легко обнаруживается обслуживающим персоналом по сильному запаху. Путем запрессовки горячей массы волокна до плотности  $500\text{ кг/м}^3$  удастся предотвратить развитие горения в кипе.

Отсутствие случаев самовозгорания кип волокна при их многолетнем хранении на складах, а также постоянная приемка кип текстильными фабриками без обнаружения обуглившихся масс волокна

внутри кипы позволяет исключить возможность загорания кип волокна при транспортировке от технологических причин.

На основе рассмотрения приведенных данных можно было считать, что наиболее вероятными причинами пожаров кип волокна при транспортировке являлись: попадание искр от паровоза и процессы трения.

Для выяснения возможности возникновения загорания от трения проводилась исследовательская работа как в лабораторных, так и в эксплуатационных условиях.

Наряду с этим были обобщены фактические данные, получаемые при транспортировке хлопка-волокна по железной дороге.

### **Исследование возможности загорания хлопка-волокна от трения обвязочной проволоки в лабораторных условиях**

Исследование возможности загорания хлопка-волокна от трения проводилось на специальной установке \*) (рис. 1), которая имити-

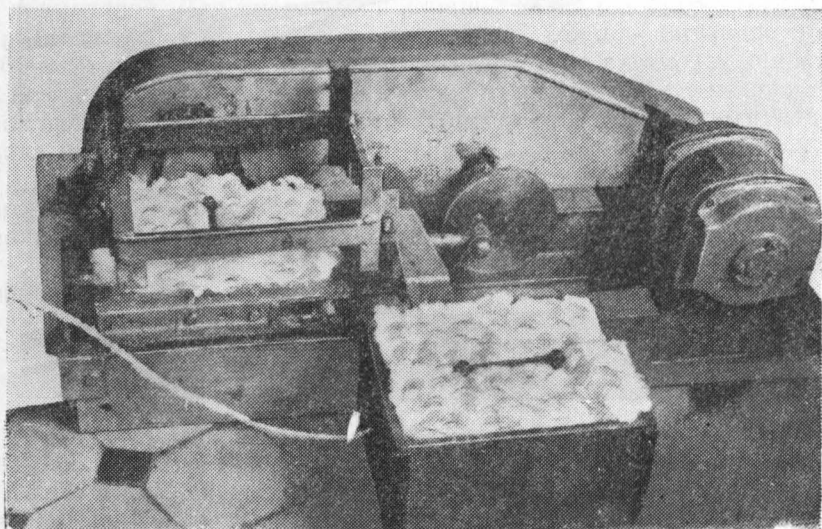


Рис. 1. Вид установки с ящиками, заполненными хлопком: слева нижний ящик с хлопком; внизу — верхний ящик (в хлопке закреплены образцы обвязочной проволоки); справа мотор, который посредством шатуна и эксцентрика приводит в действие нижний ящик.

\*) В конструировании установки принимал участие инж. Ильин Б. А.

ровала возможные условия трения обвязочной проволоки о проволоку в вагоне. Установка имела два деревянных ящика, внутри которых закреплялись на специальных планках образцы проволоки, используемой для обвязки кип. Ящики заполнялись волокном с объемным весом  $80 \text{ кг/м}^3$  (рис. 2). Такой объемный вес хлопка был выбран потому, что транспортируемые кипы имеют разрывы тарной ткани, и распушенный хлопок может находиться в месте трения проволоки.

При испытании ящики устанавливались друг над другом таким образом, чтобы образцы проволоки скрещивались, соприкасаясь при трении только небольшой поверхностью. Условия трения проволок были приняты на основании наблюдавшихся на практике случаев (рис. 2).

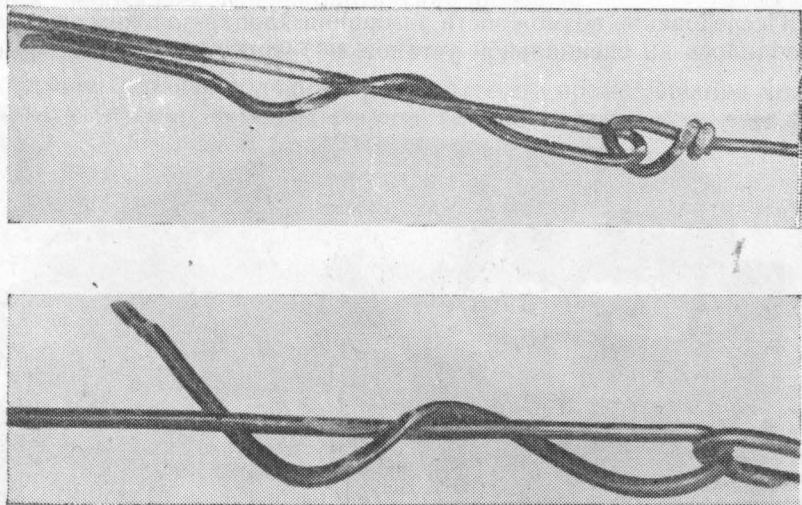


Рис. 2. Части проволочных бандажей, снятых с кип хлопка после их транспортировки по железной дороге. Следы трения проволок в местах перегибов.

В установке нижний ящик монтировался между специальными направляющими и мог передвигаться в горизонтальном направлении. Ящик приводился в движение с помощью эксцентрика, соединенного через трансмиссию с мотором мощностью  $0,24 \text{ квт}$ . Путем закрепления шатуна в прорези эксцентрика на разных расстояниях имелась возможность менять ход нижнего ящика от  $10$  до  $60 \text{ мм}$ . Указанные величины смещения были приняты с учетом размеров потертости,

наблюдавшейся на образцах обвязочных бандажей, изъятых из мест, где возникали загорания кип хлопка при транспортировке, а также полученных данных при опытных перевозках.

Число движений ящика в минуту могло изменяться на установке от 70 до 110 (одно движение соответствовало двойному ходу ящика). Принятое число движений соответствовало числу возможных встряхиваний вагона, вызываемых главным образом стыками рельс при скоростях поезда от 50—80 км/час.

Верхний ящик устанавливался в специальной рамке с вертикальными направляющими, исключающими возможность его перемещения в горизонтальном направлении. Свободно опираясь на скрещение проволок, закрепленных в верхнем и нижнем ящиках, он передавал месту соприкосновения проволок нагрузку  $P$ , создаваемую грузами, установленными на днище ящика.

Для замера температур нагрева при трении к образцам проволоки припаивались хромель-копелевые термомпары.

В связи с тем, что оловянный припой при температуре выше  $230^{\circ}$  расплавлялся, мог нарушиться тепловой контакт между проволокой и термомпарой. Для уменьшения влияния этого недостатка была выбрана такая форма образцов проволоки (длина заготовки 150 и 160 мм), при которой обеспечивалось довольно плотное ее прижатие с помощью болтов к планкам и сохранялся контакт с термомпарой на все время опыта. Форма применявшихся образцов проволоки показана на рис. 3.

При проведении лабораторной работы, связанной с выяснением возможности загорания хлопка-волокна при трении обвязочной проволоки, исследовалась зависимость возникающих температур от:

а) величины нагрузки, длины проволок и формы трущихся поверхностей;

б) скорости трения;

в) степени твердости проволоки, сорта хлопка и наличия тарной ткани;

г) наличия перерывов в процессе тления.

Для указанной работы подсчитывалась возможная на практике нагрузка  $P$  на площадь трения. При подсчете исходили из:

1) 4-ярусной укладки кип в вагонах;

2) наличия трения между узлами обвязочной проволоки кип 1 яруса и проволокой кип 2 яруса (считая от пола вагона);

3) взаимно перпендикулярного расположения проволок при трении;

4) диаметра проволоки 4,5 мм (согласно ГОСТу 3282—46) и площади трения для одного узла (две скрещенных проволоки)  $20,25 \text{ мм}^2$ ;



5) равномерного распределения нагрузки на все узлы кипы 1 яруса (в местах трения).

В таблице 1 приведены нагрузки  $P$  на каждый узел кипы (в месте трения) и на  $1 \text{ мм}^2$  площади трения, подсчитанные в зависимости от веса кип и количества стягивающих поясов (согласно ГОСТу 3152—54).

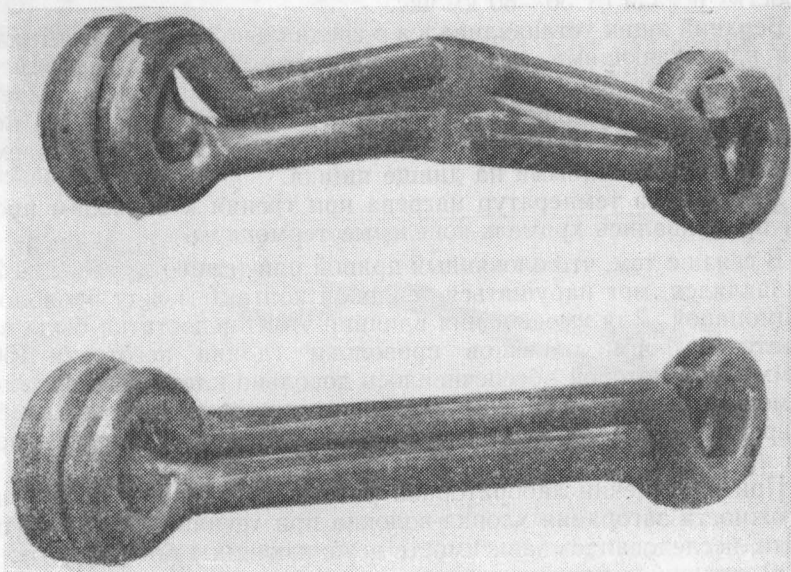


Рис. 3. Форма применявшихся образцов проволоки:  
вверху — образец проволоки для нижнего ящика; внизу — образец проволоки для верхнего ящика.

Из таблицы 1 видно, что наименьшая нагрузка  $P$ , приходящаяся на узел (в месте трения) составляет — 57,3 кг. В проводившихся опытах по определению зависимости температур, возникающих при трении отожженных проволок, от величины нагрузки, последняя первоначально принималась равной — 50 кг. В связи с получением при этой нагрузке высоких температур в опытах принимались также уменьшенные нагрузки, равные 25, 20, 16 и 11 кг. Ход нижнего ящика в указанных опытах был равен 60 мм, число движений в мин. — 105.

Таблица 1

Тип и мощность пресса в т	Вес одной кн- пы в кг	Вес 3-х кнп в кг	Количество поясов	Количество узлов	Нагрузка Р в кг. приходящаяся на	
					узел (в месте трения)	1 мм <sup>2</sup> пло- щади тре- ния, кг/мм <sup>2</sup>
Гидравлический						
550	220	660	11	11	60	3
500	210	630	11	11	57,3	2,8
400	205	615	10	10	61,5	3,1
300	185	555	9	9	61,7	3,1
250	165	495	8	8	61,8	3,1
200	160	480	8	8	60,0	3,0
150	150	450	7	7	64,3	3,2
Б-375						
550	205	615	9	9	68,5	3,4
Винтовой	125	375	5	5	75,0	3,7

Скорость трения равнялась 12600 мм/мин. Подсчитывалась скорость трения из формулы [1]:

$$V = 2 \cdot L \cdot n \quad [1]$$

где: V — скорость трения в мм/мин.;

L — ход нижнего ящика в мм;

n — число движений в мин.

Результаты опытов приведены в табл. 2 и на рис. 4.

Из данных, приведенных в таблице 2, можно сделать вывод, что при скорости трения 12600 мм/мин. и удельной нагрузке, значительно меньшей указанной в таблице 1, создаются опасные для загорания хлопка температуры. Об этом свидетельствует сильное обугливание хлопка, наблюдавшееся в опыте № 20 при удельной нагрузке 0,21 кг/мм<sup>2</sup>, что в действительных условиях транспортировки хлопка могло бы привести, вследствие лучшей аккумуляции тепла, к горению материала.

В таблице 2 наблюдается некоторое различие в состоянии хлопка (обугливание или горение) и температурах для одной и той же серии опытов. Это различие является результатом сложности исследуемого процесса и его зависимости от многих факторов. Тем не менее, как это видно из той же таблицы 2, условия проведения опытов удалось идентифицировать настолько, что зависимость между



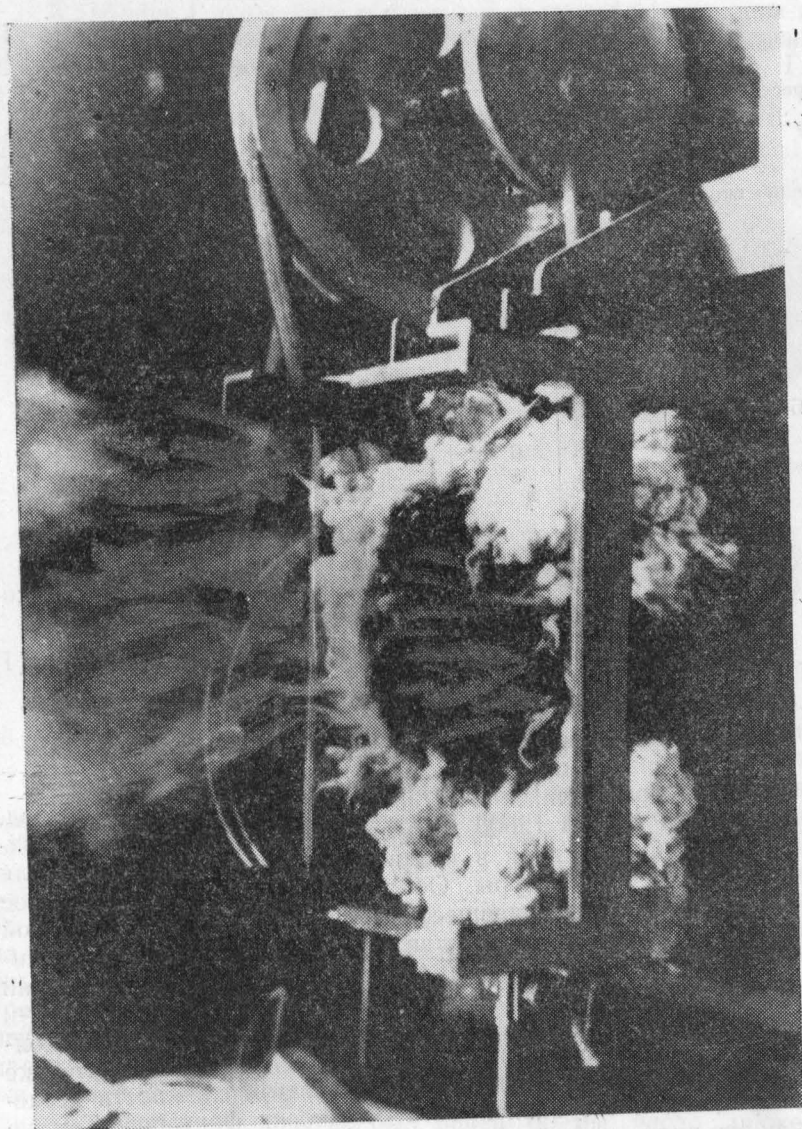


Рис. 4. Горение хлопка в опыте № 1.

температурами, возникающими при трении, и нагрузкой выявляется довольно отчетливо.

Известное сходство температурных кривых, полученных, например, из опытов №№ 3 и 4, закончившихся обугливанием хлопка, и опытов №№ 7 и 8, завершившихся горением материала (рис. 5), также доказывает одинаковость процессов, возникающих при одной и той же нагрузке и могущих привести к одному и тому же результату. Если все же этот результат в ряде опытов одной серии и не получался вполне идентичным, то причину этому следует искать в недостаточном совершенстве механического исполнения опыта. Существенное влияние на результаты опыта могли оказывать, например, качество изготовления и крепления образцов трущихся проволок, условия контакта их с хлопком и др.

Таблица 2

№№ п/п.	Средняя тверд. по Роквеллу	Нагрузка Р		Максимальн. температура при трении	Состояние хлопка в конце опыта
		на узел, кг	кг/мм <sup>2</sup>		
1	2	3	4	5	6
1	48,5	50	0,62	315	Горел
2	61,0	50	0,65	400	»
3	56,5	25	0,33	358	Обуглился
4	48,6	25	0,34	376	»
5	52,0	25	0,34	270	»
6	52,0	25	0,33	400	Горел
7	53,5	25	0,33	325	»
8	50,0	25	0,34	515	»
9	52,0	25	0,32	380	»
10	63,0	20	0,26	287	Обуглился
11	58,0	20	0,26	282	»
12	45,5	20	0,25	325	»
13	13,0	20	0,31	300	»
14	56,0	20	0,25	385	Горел
15	51,0	16	0,21	233	Пожелтел
16	51,5	16	0,20	292	Стал коричневым
17	54,0	16	0,21	232	Пожелтел
18	59,0	16	0,21	228	»
19	49,0	16	0,20	295	Стал коричневым
20	55,0	16	0,21	327	Обуглился
21	51,5	11	0,14	198	Слегка пожелтел

Изгиб проволоки при трении, как показано на рис. 3, наблюдавшийся в отдельных опытах, а также ослабление крепления образцов сказывались на эффективности работы трения.

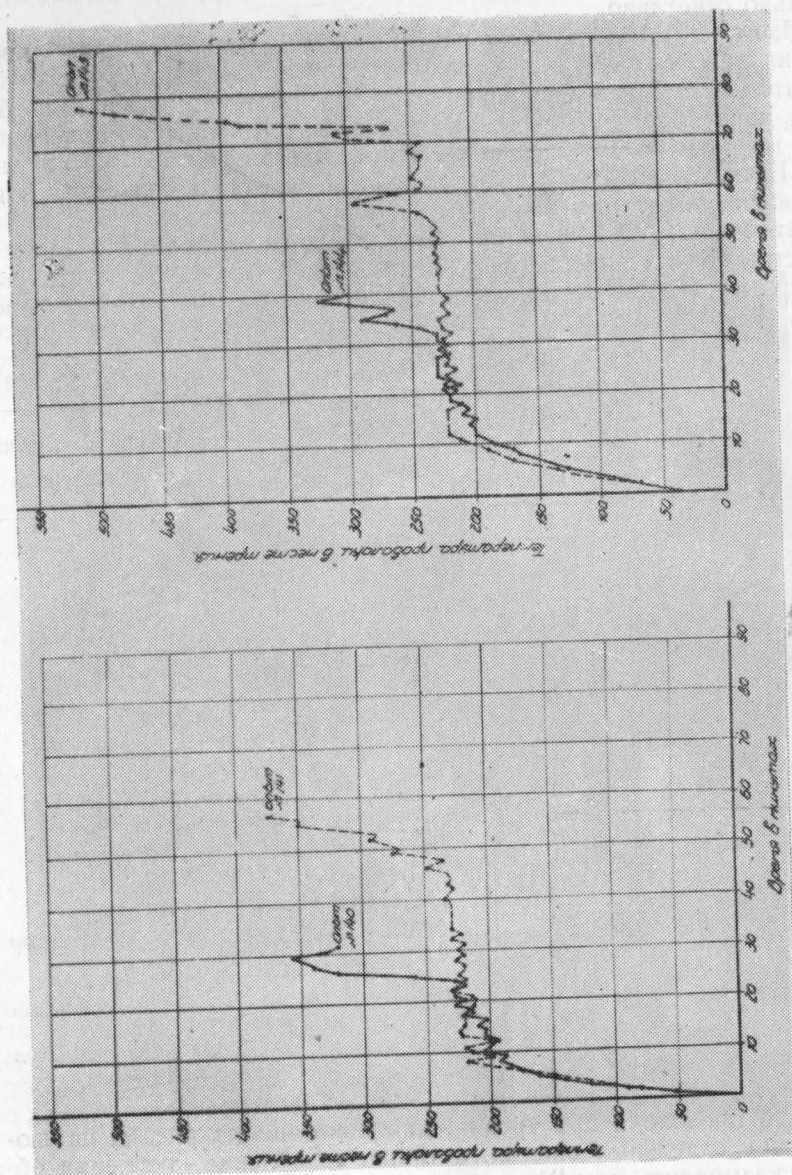


Рис. 5. Температурные кривые опытов 3 (№ 140), 4 (№ 141), 7 (№ 144) и 8 (№ 145).

Данные таблицы 2 показывают возможность значительного разогрева трущихся образцов проволоки. Поскольку в этих опытах использовались укороченные образцы проволок, то возникал вопрос: не будет ли увеличение длины этих проволок снижать степень их разогрева. С этой целью проверялось влияние на степень разогрева длины проволоки, размеров и формы трущихся поверхностей.

Опыты показали, что отсутствует влияние указанных параметров на степень разогрева проволоки в месте трения, что объясняется наличием в нем локального нагрева и подтверждается дополнительными замерами температуры, производившимися в местах крепления образцов проволоки к планкам.

Несмотря на небольшое расстояние от места трения (33 мм) эти замеры температуры проволоки показали, что наибольшая ее величина (например в опыте № 1) была равна всего лишь  $53^{\circ}$ , тогда как в месте трения она достигла  $315^{\circ}$ .

Из приведенной выше формулы [1] видно, что скорость трения зависит от величины хода нижнего ящика и числа его движений в минуту. Уменьшая ход ящика или число движений, можно уменьшить также скорость трения.

В проводившихся опытах по выявлению зависимости температуры, возникающих при трении отожженных проволок, от скорости трения использовались указанные варианты ее изменения. Результаты опытов приведены в таблице 3. На основании этих данных можно сделать следующие выводы:

1. С уменьшением хода ящика и тем самым скорости трения образцов проволоки уменьшается опасность загорания хлопка.

2. При нагрузке  $0,6 \text{ кг/мм}^2$  опасность загорания хлопка создается при скорости трения проволок, равной  $\sim 6000 \text{ мм/мин.}$ , а для нагрузки  $0,3 \text{ кг/мм}^2$  —  $\sim 9000 \text{ мм/мин.}$

3. Изменение числа движений ящика в минуту с 105 до 80 при сохранении близких между собой скоростей трения обеспечивает получение примерно одинаковых результатов.

Если полагать, что основные колебательные движения вагона создаются в результате сотрясений, производимых стыками рельс, то зависимость между скоростью поезда и числом движений может быть выражена следующим уравнением:

$$n = \frac{V_1 \cdot 1000}{60 \cdot 12} \quad [2]$$

где:  $n$  — число движений в мин.;

$V_1$  — скорость поезда в км/час;

12 — длина рельса в м.

Таблица 3

№№ п/п.	Средняя твердость по Роквеллу	Нагрузка		Ход ящика, мм	Число движений в мин.	Скорость трения в мм/мин	Максим. т-ра при трении	Состояние хлопка в конце опыта
		на узел трения, кг	в кг/мм <sup>2</sup>					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	54,0	50	1,25	12	105	2500	234	Стал коричневым
2	45,3	50	0,63	30	103	6200	346	Горел
3	47,0	25	0,32	30	103	6200	183	Слегка пожелтел
4	53,6	25	0,32	36	103	7400	200	» »
5	42,5	25	0,32	45	105	9400	310	Горел
6	47,0	25	0,31	60	80	9600	273	»

Подставляя уравнение [2] в уравнение [1], получаем для скорости поезда следующее выражение:

$$V_1 = \frac{0,36 \cdot V}{L} \quad [3]$$

Из уравнения [3] можно подсчитать, что опасная для нагрузки 0,63 кг/мм<sup>2</sup> скорость трения проволок в 6200 мм/мин., при зазоре между кипами в 60 мм (аналогична ходу нижнего ящика в лабораторной установке), достигается лишь при скорости поезда ~37 км/час. Чтобы получить указанную скорость трения при меньших зазорах, скорость поезда должна увеличиваться и наоборот.

Опасная для нагрузки 0,32 кг/мм<sup>2</sup> скорость трения 9400 мм/мин., при зазоре между кипами в 60 мм, достигается при скорости поезда ~56 км/час.

Небезынтересно отметить, что в исследованиях, связанных с возможностью загорания хлопка от трения, проводившихся в США (1) (5), также указывается, что одним из факторов, способствующих загоранию хлопка, является скорость поезда.

Изучение зависимости температур, возникающих при трении, от степени твердости проволоки, сорта хлопка и наличия тарной ткани позволило сделать следующие выводы:

1. Отожженная проволока с понижением ее твердости почти до 0 (по Роквеллу) не предотвращает возможности загорания хлопка при трении.

2. Различие в поведении хлопка разных сортов при трении проволоки не наблюдалось.



3. Укрытие хлопка тарной тканью не исключает возможность его загорания при трении проволок.

С целью выяснения, как влияют остановки во время перевозок хлопка на возможность его загорания от трения обвязочной проволоки, проведена серия опытов с перерывами в процессе трения на 10, 30, 60 и 120 минут.

Результаты опытов показали, что прекращение трения обвязочной проволоки на некоторое время с последующим его возобновлением создает такую же опасность загорания хлопка, как и в случаях трения проволок без перерыва.

Это объясняется тем, что наиболее опасным для загорания хлопка является момент перетирания проволок, когда создаются наибольшие нагрузки, и в результате проволоки нагреваются до высоких температур.

### **Исследование в эксплуатационных условиях возможности загорания хлопка-волокна от трения**

Параллельно с лабораторными исследованиями были организованы опытные перевозки кип хлопка-волокна в 2-осных вагонах на Ташкент-Туркестанском участке Ташкентской железной дороги между станциями Кауфманская—Ташкент-Туркестан.

Укладка кип в вагонах для опытных перевозок производилась в три яруса с предусмотрением всевозможных вариантов трения (узлов одних кип об узлы соседних кип, проволоки о болты крышевых дуг вагона и т. п.) (3).

В процессе проведения опытных перевозок (всего их было 5) наблюдались (во всех опытах) случаи довольно сильной потертости на обвязочной проволоке, на болтах, укрепленных в стенках и крышевых дугах вагона, на поверхностях кип хлопка-волокна. Это свидетельствовало о наличии процессов трения в вагонах в горизонтальном и вертикальном направлениях. Несмотря на происходившее трение проволок, не было обнаружено загорания или обугливания хлопка-волокна при опытных перевозках, что может быть объяснено небольшой скоростью движения поездов (скорость колебалась в пределах 31—38 км/час.) и сравнительно плотной укладкой кип в 1 и 2 ярусах от пола вагона. Согласно произведенным подсчетам средняя величина зазора между кипами составляла 15 мм. Такой зазор для кип 1 и 2 яруса, между которыми удельная нагрузка в местах трения могла достигать максимальной величины ( $1,3 \text{ кг/мм}^2$ ), исключал возможность обугливания и загорания хлопка и при больших скоростях поезда, что следует из данных лабораторных исследований.

Помимо отмеченных особенностей, на полученные результаты при опытных перевозках оказывала, повидимому, влияние чрезвычайная сложность исследуемого процесса и его зависимость от очень многих факторов. Отсутствие, например, постоянного контакта одних и тех же участков обвязочной проволоки при трении, особенно в момент перетирания, исключало эффективность нагрева проволоки. Наблюдавшиеся частые остановки вагонов при опытных перевозках могли способствовать нарушению такого контакта и привести к указанным выше результатам. Воспроизведение всех необходимых условий для загорания хлопка от трения является делом весьма сложным. Поэтому нельзя считать, что при отсутствии отмеченных недостатков можно было бы пятью опытными перевозками воспроизвести условия, вызывающие на практике загорание хлопка от трения.

Полезность проведенных опытных перевозок заключается в том, что они достаточно убедительно и наглядно показали наличие довольно активных процессов трения при транспортировке хлопка и возможность их развития как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях.

### **Обобщение фактических данных о пожарах хлопка-волокна при железнодорожных перевозках**

Для получения более достоверных материалов о причинах загораний хлопка-волокна при железнодорожных перевозках обобщались фактические данные о случаях пожаров хлопка. Эти данные показали, что загорания хлопка-волокна при перевозке по железной дороге происходит от двух причин:

- 1) от искр паровозов, проникающих внутрь вагона через незаделанные в нем щели;
- 2) от повышения температуры в местах трения обвязочной проволоки одной килы о проволоку другой, соседней килы.

Пожары хлопка-волокна от искр происходят в результате нарушения правил перевозки хлопка, т. е. при использовании вагонов с незаделанными щелями. В ряде актов о пожарах отмечается, что очаги загорания находились вблизи щелей. Такие пожары наблюдаются во все времена года и, фактически, при любом местонахождении вагона в составе поезда, так как загорание происходит как от искр ведущего паровоза, так и от искр встречных паровозов. Ниже приведены фотоснимки (рис. 6 и 7), взятые из акта о пожаре хлопка-волокна, возникшего от искр. Эти снимки подтверждают правильность установленной причины пожара и показывают характер его развития.



При перевозке хлопка-волокна в условиях, исключающих возможность попадания в вагон искр, загорание хлопка происходило от трения обвязочной проволоки. Это подтверждают обнаруженные очаги загорания, находившиеся в большинстве случаев между кипами 1 и 2 ярусов от пола, примерно, в средней части вагона. В ме-

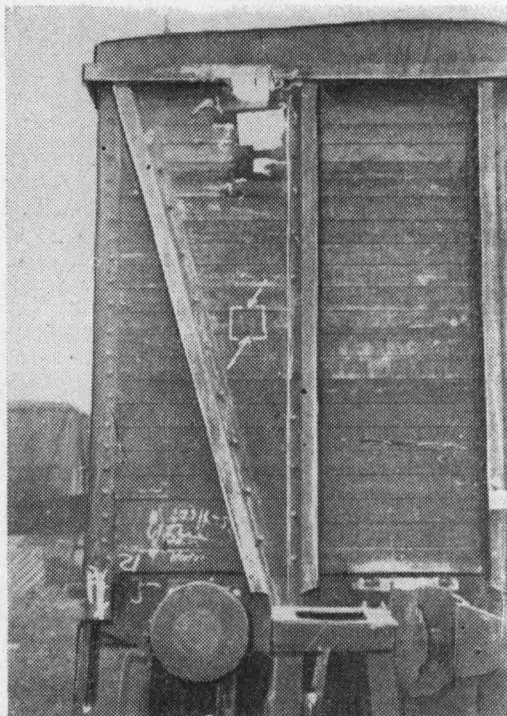


Рис. 6. Характер обгорания стенки вагона с наружной стороны (мелом обведено месторасположение щелей, через которые искры проникли внутрь вагона).

стах загорания хлопка отмечалась сильная потертость обвязочной проволоки, при касании ее с узлами кип или узлов между собой. В актах отмечается, что обвязка кип хлопка произведена в ряде случаев с нарушением правил упаковки кип (ГОСТ 3152—54), так как узлы проволоки выступают над поверхностью кип более, чем на 15 мм.



Пожары от трения проволоки наблюдались в двух и четырех-  
осных вагонах. Своевременное обнаружение загорания хлопка при  
некоторых пожарах позволяло довольно точно определять их при-  
чину, связанную с трением проволок.

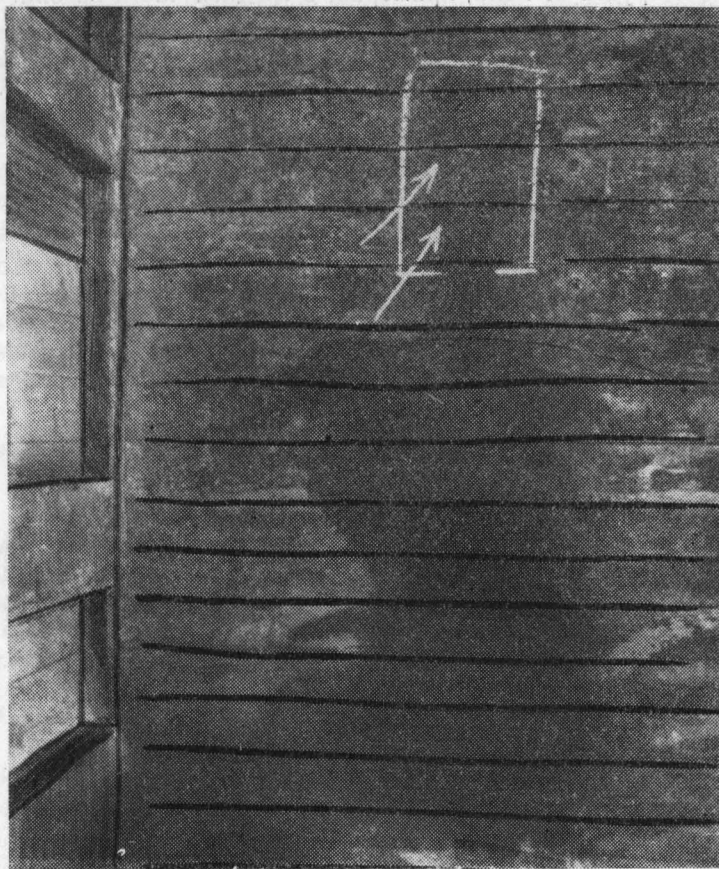


Рис. 7. Характер обгорания стенки внутри вагона.

Так, например, в одном из актов о пожаре указывается, что  
вагон в техническом и коммерческом отношениях был исправный,  
без щелей в кузове, полу и дверях. Загорание волокна произошло  
между двумя смежными кипами 1 и 2 ярусов, во втором ряду от



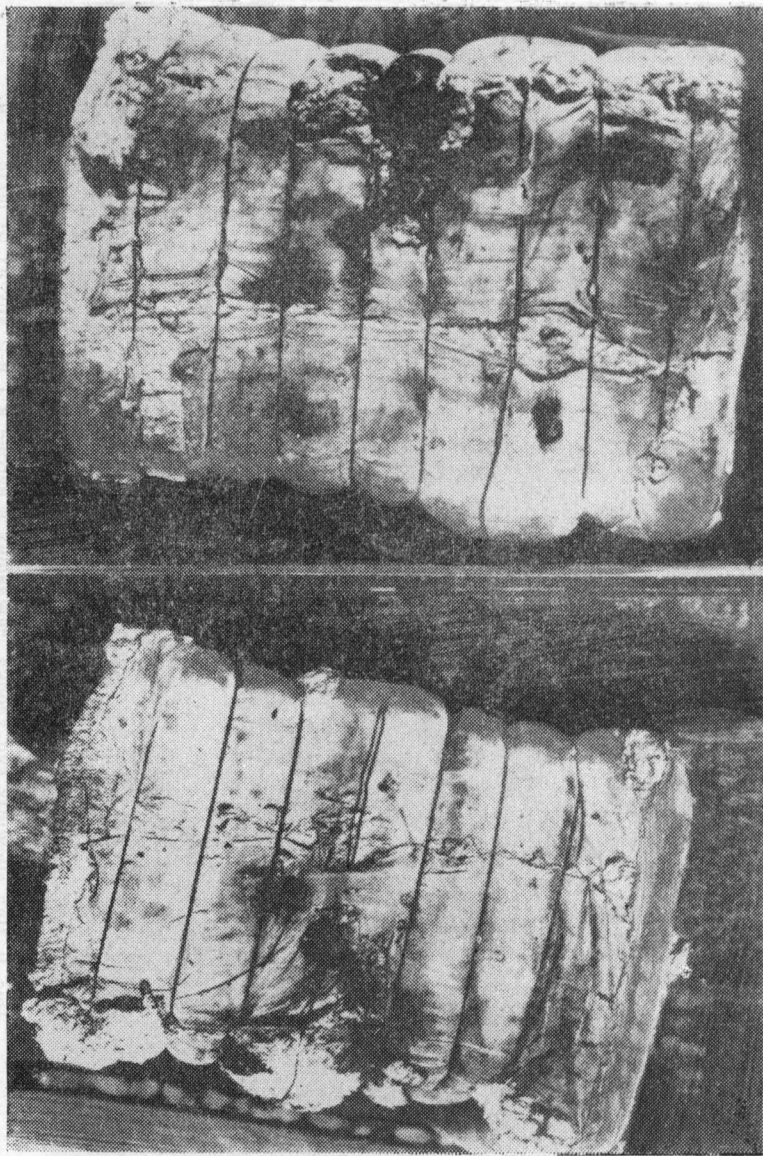


Рис. 8. Вид двух смежных кип хлопка, лежащих в вагоне в 1 и 2 ярусах от пола.

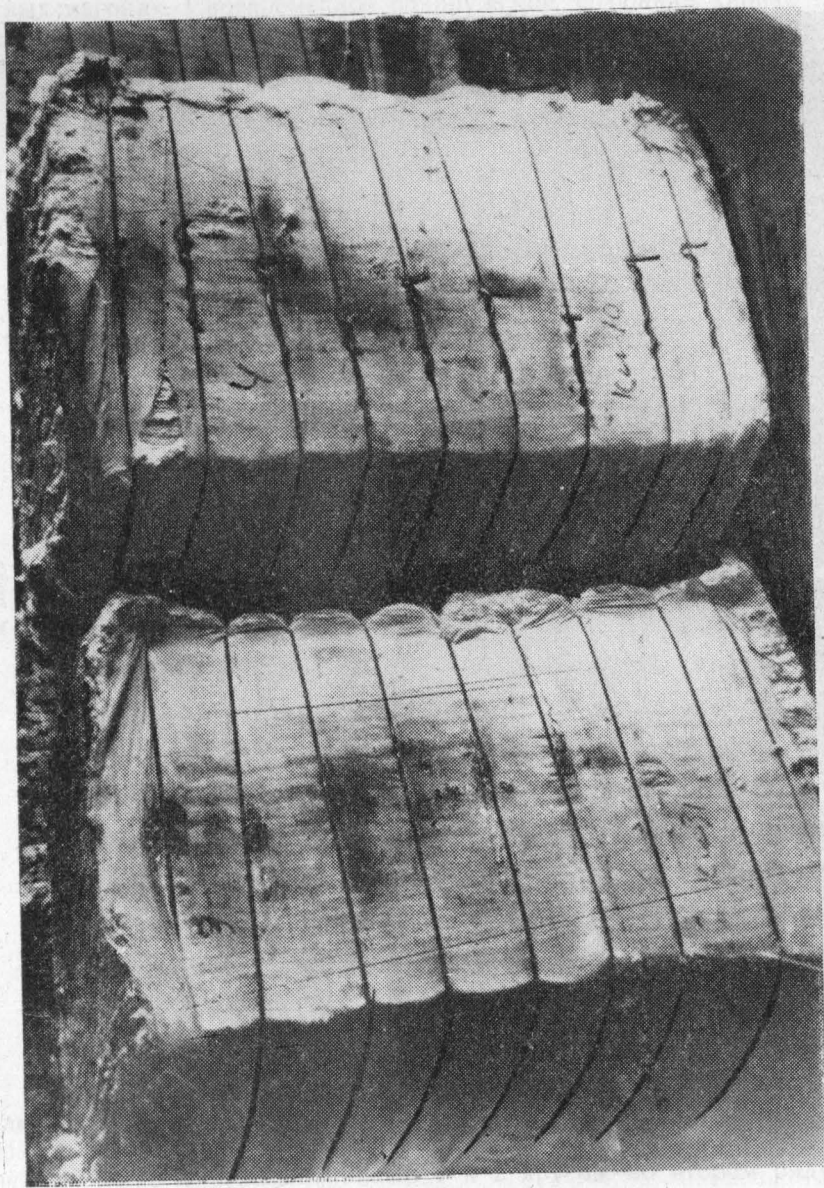


Рис. 9. Вид смежных кип хлопка, лежащих в вагоне в 1 и 2 ярусах от пола.



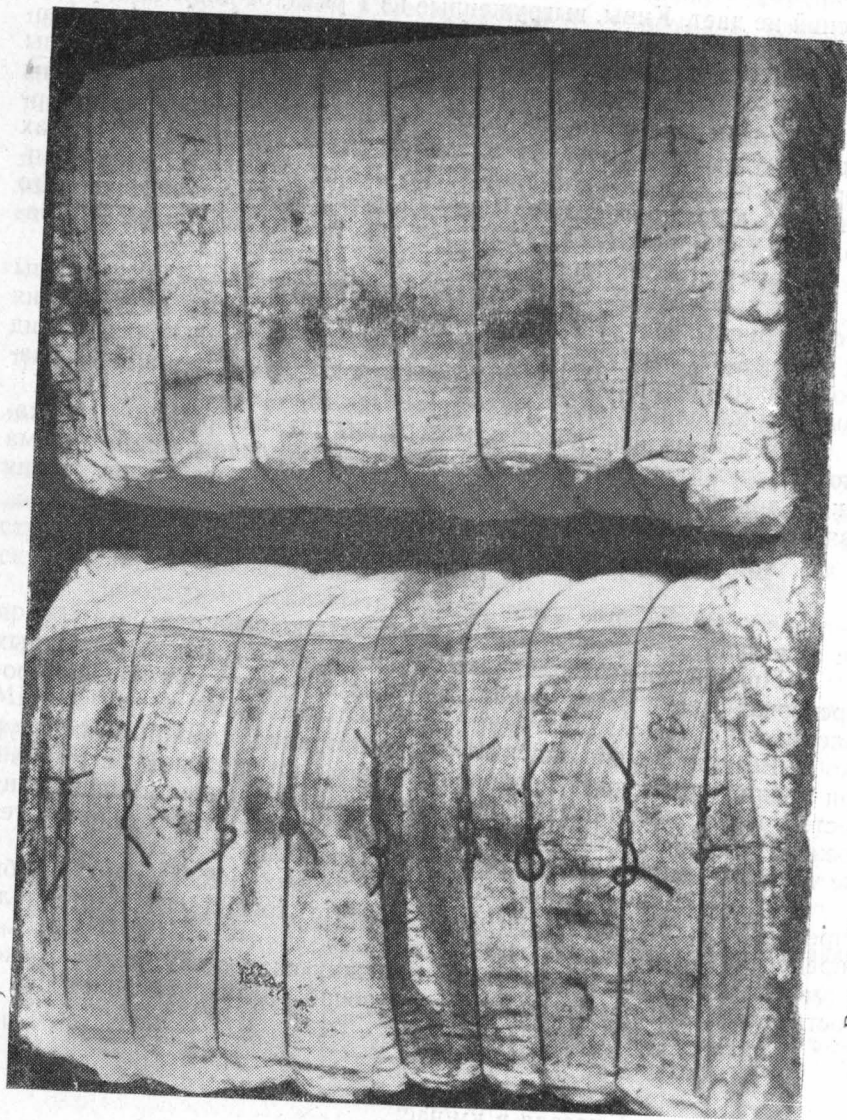


Рис. 10. Вид смежных кип хлопка, лежащих в вагоне в 1 и 2 ярусах от пола.

дверного проема. Поезд следовал с тепловозом серии ДА, который искрений не дает. Кипы, выгруженные из 1 ряда, от дверного проема огнем не были затронуты. Загоревшиеся две кипы 2 ряда (от дверного проема) были залиты водой. При осмотре оказалось, что узлы поясов не утоплены в кипах. Проволока одной кипы терлась об узлы обвязочной проволоки другой кипы, о чем свидетельствовала потертость в двух местах, которая достигала  $\frac{1}{5}$  ее толщины. В местах потертости проволоки произошло обугливание хлопка. Очаг обугливания был диаметром около 10 см с дальнейшим увеличением его ширины и глубины к ребру кипы. На рис. 8 показаны очаги загорания на двух смежных кипах.

К акту о другом пожаре хлопка-волокна также приложены фотоматериалы (рис. 9 и 10), показывающие характер обугливания кип в местах потертости проволоки (темные места на кипах) и вид узлов обвязочной проволоки, выполненных с нарушением правил упаковки кип хлопка-волокна.

Приведенные фактические материалы по загораниям хлопка-волокна служат наряду с лабораторными исследованиями весьма веским доказательством возможности их возникновения от трения обвязочной проволоки.

### Выводы

В результате проведенной работы установлено:

1. Причинами возгорания хлопка-волокна при железнодорожных перевозках могут быть: искра паровоза и трение обвязочной проволоки.

2. Возникновение опасных для возгорания хлопка температур при трении обвязочной проволоки зависит от удельной нагрузки в месте трения, величины зазора между кипами, скорости движения поезда, условий, способствующих постоянному контакту одних и тех же трущихся между собой участков проволоки.

3. Для возникновения загорания хлопка необходимо, чтобы определенной удельной нагрузке в месте трения соответствовала определенная скорость трения.

4. Существующая зависимость между скоростью трения и скоростью поезда выражается, ориентировочно, следующей формулой:

$$V_1 = \frac{0,36 \cdot V}{L}$$

где:  $V_1$  — скорость поезда в км/час;

$V$  — скорость трения в мм/мин.;

$L$  — величина зазора между кипами в мм.

5. Применение разных сортов хлопка, а также наличие или отсутствие тарной ткани в месте трения не оказывали влияние на получаемые результаты в опытах.

6. Прекращение трения обвязочной проволоки на 2 часа с последующим его возобновлением создает такую же опасность загорания хлопка, как и в случаях трения проволок без перерыва.

7. Загорание хлопка от трения обвязочной проволоки, наблюдавшееся на практике, происходит, главным образом, в местах трения узла с проволокой, расположенных между кипами 1 и 2 ярусов от пола вагона.

### Предложения

Для исключения возможности загорания хлопка-волокна при транспортировке по железной дороге необходимо:

1. Добиваться наиболее плотной укладки кип хлопка-волокна в вагоны.

2. Обвязка кип проволокой должна производиться таким образом, чтобы узлы всех поясов кипы строго находились на одной линии, по возможности были утоплены и не имелось свободно выступающих петель и ответвлений, которые способствовали бы их скречиванию с проволокой смежных кип.

3. Необходимо исключить возможность зацепления обвязочной проволокой, при укладке кип хлопка, различных металлических выступов, имеющих в вагоне.

4. Должны строго соблюдаться разработанные и утвержденные МПС СССР в 1955 г. «Правила перевозок отдельных видов грузов и выполнения коммерческих операций на станциях и железнодорожных подъездных путях».

### ЛИТЕРАТУРА

1. Railway Age т. 140 № 10, стр. 40, 1956.
2. В. Королев, «Советский хлопок» № 10, 1938 г.
3. С. И. Таубкин, В. К. Волкова, Н. С. Никитина, А. Н. Баратов, А. В. Панин, Отчет ЦНИИПО и ВНИИ железнодорожного транспорта, 1958 г.
4. С. И. Таубкин, Инф. сборник ЦНИИПО, изд. Минкомхоз, РСФСР, 1956 г.
5. Railway Age т. 138 № 22, стр. 11—13, 1955 г.
6. Б. Г. Тидеман и Д. Б. Сциборский, «Химия горения», изд. Наркомхоза, 1940 г.



Инженер АНТОНОВ Н. М.

## ОГНЕГАСЯЩАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СПРИНКЛЕРНЫХ И ДРЕНЧЕРНЫХ СИСТЕМ В ГАРАЖАХ

### Введение

Спринклерные и дренчерные системы, как специальное, автоматическое огнегасительное устройство, давно применяются в различных зданиях и сооружениях, в том числе и в гаражах.

Однако до настоящего времени как у нас, так и по имеющимся данным за рубежом нет проверенных материалов, характеризующих негасящую эффективность спринклерных и дренчерных систем при горении легковых автомобилей в гаражах.

Таким образом, этот актуальный вопрос, определяющий устройство указанных систем в гаражах, по существу оставался неопределенным до последнего времени. Это обстоятельство, по-видимому, является причиной нечеткости указания (по устройству спринклерных и дренчерных систем), которое имеется в Нормах и технических условиях проектирования гаражей Н-113—54.

В пункте 52 Норм, например, сказано: «В зданиях гаражей с более чем двумя этажами, в помещениях для хранения автомобилей, гаражных постов технического обслуживания, сообщающихся с неизолированными рампами через открытые проемы, следует устраивать спринклерное оборудование».

Помимо этого общего требования, в Нормах ничего не сказано об огнегасящей эффективности спринклерных и дренчерных систем, величинах интенсивности подачи воды через спринклеры (дренчеры), о дренчеровании гаражей, о создании водозащитных зон, о необходимом времени пожаротушения в гаражах и т. д.

Известно также, что, поскольку устройство и эксплуатация спринклерных и дренчерных систем требуют определенных материальных затрат и большого количества металлических труб, часть работников проектно-строительных организаций и пожарной охраны принципиально относится к спринклерованию гаражей.

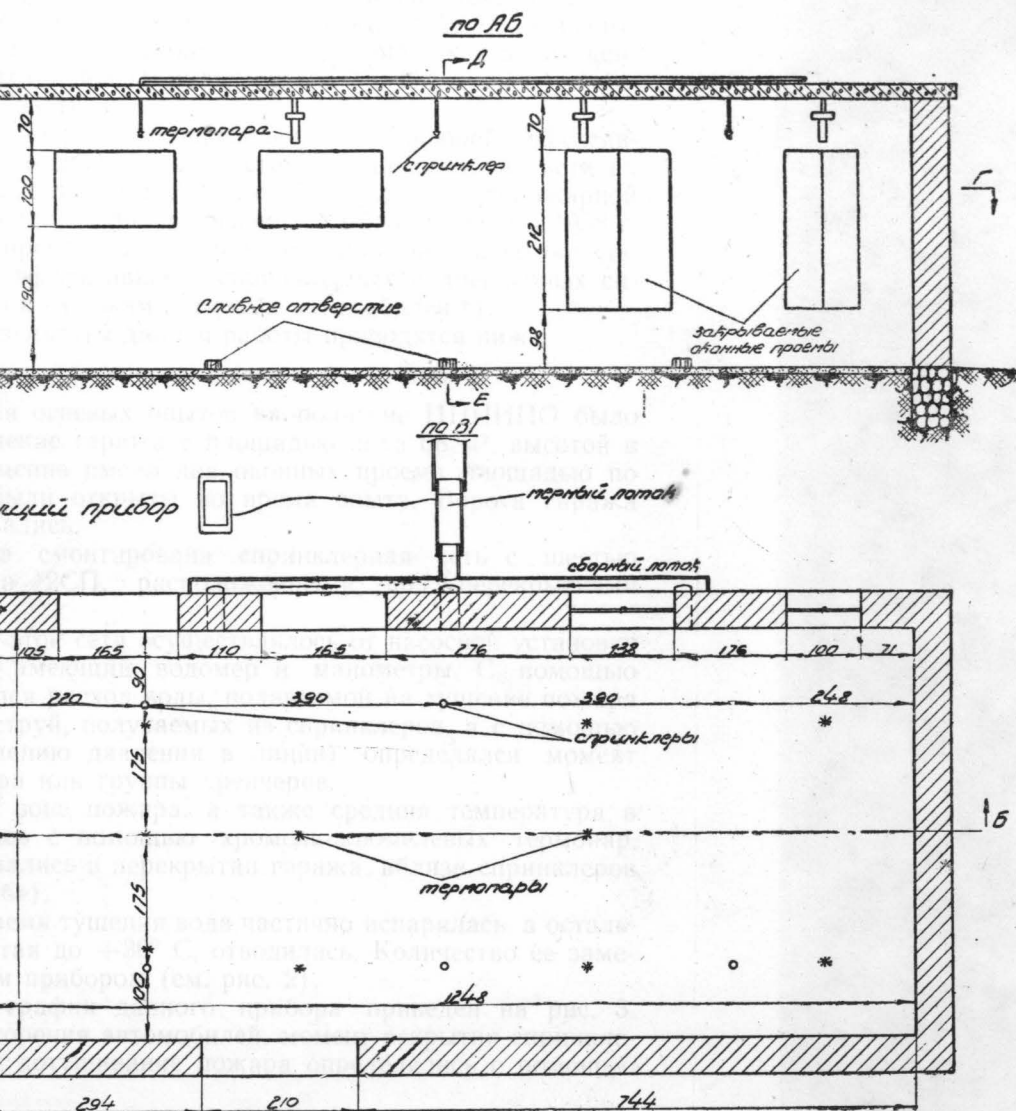


Рис. 1 «а».



# Инженер А. П. ЛЕВЧЕНКО И. М. СИСТЕМА СДРИВЕРНЫХ СИСТЕМ В ГАРАЖАХ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ  
 2. ПОДРОБНОСТИ  
 3. ПОДРОБНОСТИ  
 4. ПОДРОБНОСТИ  
 5. ПОДРОБНОСТИ  
 6. ПОДРОБНОСТИ  
 7. ПОДРОБНОСТИ  
 8. ПОДРОБНОСТИ  
 9. ПОДРОБНОСТИ  
 10. ПОДРОБНОСТИ  
 11. ПОДРОБНОСТИ  
 12. ПОДРОБНОСТИ  
 13. ПОДРОБНОСТИ  
 14. ПОДРОБНОСТИ  
 15. ПОДРОБНОСТИ  
 16. ПОДРОБНОСТИ  
 17. ПОДРОБНОСТИ  
 18. ПОДРОБНОСТИ  
 19. ПОДРОБНОСТИ  
 20. ПОДРОБНОСТИ  
 21. ПОДРОБНОСТИ  
 22. ПОДРОБНОСТИ  
 23. ПОДРОБНОСТИ  
 24. ПОДРОБНОСТИ  
 25. ПОДРОБНОСТИ  
 26. ПОДРОБНОСТИ  
 27. ПОДРОБНОСТИ  
 28. ПОДРОБНОСТИ  
 29. ПОДРОБНОСТИ  
 30. ПОДРОБНОСТИ  
 31. ПОДРОБНОСТИ  
 32. ПОДРОБНОСТИ  
 33. ПОДРОБНОСТИ  
 34. ПОДРОБНОСТИ  
 35. ПОДРОБНОСТИ  
 36. ПОДРОБНОСТИ  
 37. ПОДРОБНОСТИ  
 38. ПОДРОБНОСТИ  
 39. ПОДРОБНОСТИ  
 40. ПОДРОБНОСТИ  
 41. ПОДРОБНОСТИ  
 42. ПОДРОБНОСТИ  
 43. ПОДРОБНОСТИ  
 44. ПОДРОБНОСТИ  
 45. ПОДРОБНОСТИ  
 46. ПОДРОБНОСТИ  
 47. ПОДРОБНОСТИ  
 48. ПОДРОБНОСТИ  
 49. ПОДРОБНОСТИ  
 50. ПОДРОБНОСТИ  
 51. ПОДРОБНОСТИ  
 52. ПОДРОБНОСТИ  
 53. ПОДРОБНОСТИ  
 54. ПОДРОБНОСТИ  
 55. ПОДРОБНОСТИ  
 56. ПОДРОБНОСТИ  
 57. ПОДРОБНОСТИ  
 58. ПОДРОБНОСТИ  
 59. ПОДРОБНОСТИ  
 60. ПОДРОБНОСТИ  
 61. ПОДРОБНОСТИ  
 62. ПОДРОБНОСТИ  
 63. ПОДРОБНОСТИ  
 64. ПОДРОБНОСТИ  
 65. ПОДРОБНОСТИ  
 66. ПОДРОБНОСТИ  
 67. ПОДРОБНОСТИ  
 68. ПОДРОБНОСТИ  
 69. ПОДРОБНОСТИ  
 70. ПОДРОБНОСТИ  
 71. ПОДРОБНОСТИ  
 72. ПОДРОБНОСТИ  
 73. ПОДРОБНОСТИ  
 74. ПОДРОБНОСТИ  
 75. ПОДРОБНОСТИ  
 76. ПОДРОБНОСТИ  
 77. ПОДРОБНОСТИ  
 78. ПОДРОБНОСТИ  
 79. ПОДРОБНОСТИ  
 80. ПОДРОБНОСТИ  
 81. ПОДРОБНОСТИ  
 82. ПОДРОБНОСТИ  
 83. ПОДРОБНОСТИ  
 84. ПОДРОБНОСТИ  
 85. ПОДРОБНОСТИ  
 86. ПОДРОБНОСТИ  
 87. ПОДРОБНОСТИ  
 88. ПОДРОБНОСТИ  
 89. ПОДРОБНОСТИ  
 90. ПОДРОБНОСТИ  
 91. ПОДРОБНОСТИ  
 92. ПОДРОБНОСТИ  
 93. ПОДРОБНОСТИ  
 94. ПОДРОБНОСТИ  
 95. ПОДРОБНОСТИ  
 96. ПОДРОБНОСТИ  
 97. ПОДРОБНОСТИ  
 98. ПОДРОБНОСТИ  
 99. ПОДРОБНОСТИ  
 100. ПОДРОБНОСТИ

В то же время бурное развитие автомобилестроения в нашей стране влечет за собой увеличение числа и объема гаражей. В настоящее время их строят многоэтажными (пять и более этажей). Стоимость этих капитальных сооружений и хранящихся в них ценностей (легковых автомобилей), сильно возросла. Повысилась и степень пожарной опасности их.

Таким образом, вопросы об определении огнегасящей эффективности спринклерных и дренчерных систем и о целесообразности их устройства в гаражах легковых автомобилей как противопожарной защиты требуют неотлагательного решения. Для этой цели в 1958 г. в ЦНИИПО была проведена экспериментальная работа по определению огнегасящей эффективности спринклерных и дренчерных систем применительно к гаражам легковых автомобилей \*).

Полученные результаты данной работы приводятся ниже.

### **Условия проведения огневых испытаний**

Для проведения огневых опытов на полигоне ЦНИИПО было оборудовано помещение гаража с площадью пола 68 м<sup>2</sup>, высотой в свету 3,5 м. Помещение имело два оконных проема площадью по 1,65 м<sup>2</sup>, которые были открыты во время опыта. Ворота гаража при пожаре закрывались.

В здании была смонтирована спринклерная сеть с шестью спринклерами типа 2СП, расположенными под перекрытиями (рис. 1 «б»).

Питание водой этой сети осуществлялось от насосной установки через трубопровод, имеющий водомер и манометры. С помощью водомера определялся расход воды, подаваемой на тушение пожара в виде капельных струй, получаемых из спринклеров, а с помощью манометра (по падению давления в линии) определялся момент вскрытия спринклера или группы дренчеров.

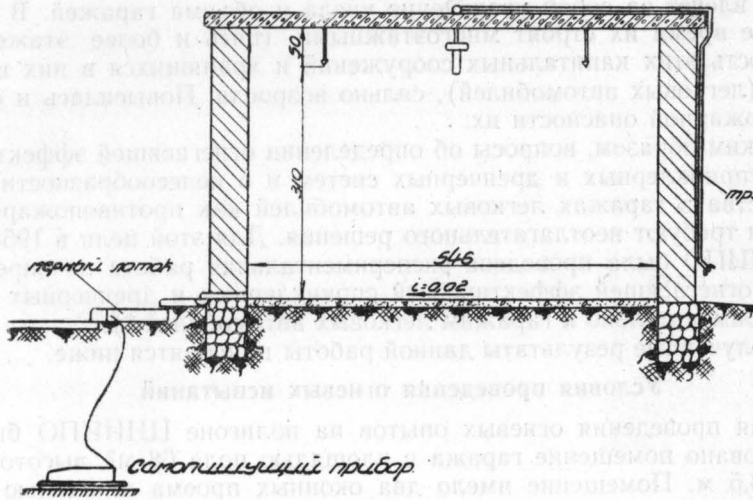
Температура в зоне пожара, а также средняя температура в гараже определялась с помощью хромель-алюмелевых термопар, которые устанавливались в перекрытии гаража, вблизи спринклеров (см. рис. 1 «а» и «б»).

Пролитая во время тушения вода частично испарялась, а остальная часть ее, нагретая до +30° С, отводилась. Количество ее замерялось специальным прибором (см. рис. 2).

Тарировочный график данного прибора приведен на рис. 3. Время свободного горения автомобилей, момент вскрытия спринклеров, локализация и дотушивание пожара определялись с помощью секундомера.

\* Руководителем работы является автор настоящей статьи, исполнителем — инженер Сучков А. А.

ПО ДЕ



### Схема спринклерной сети

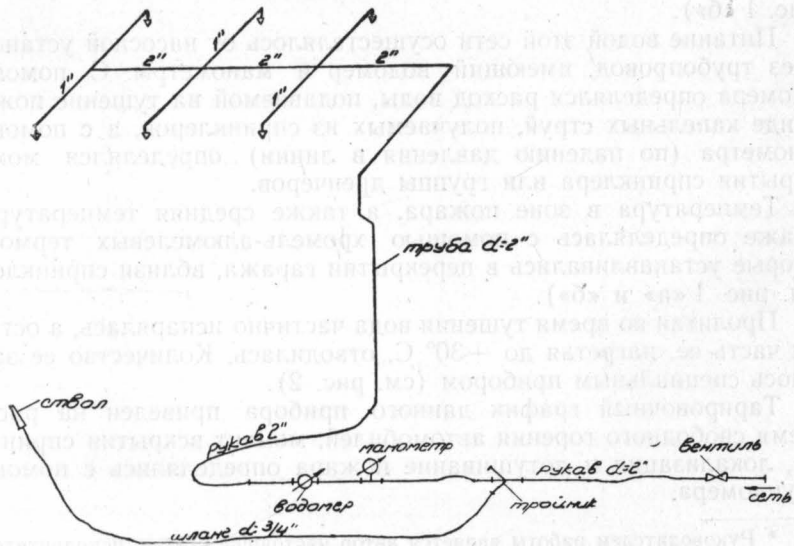


Рис. 1 «б».

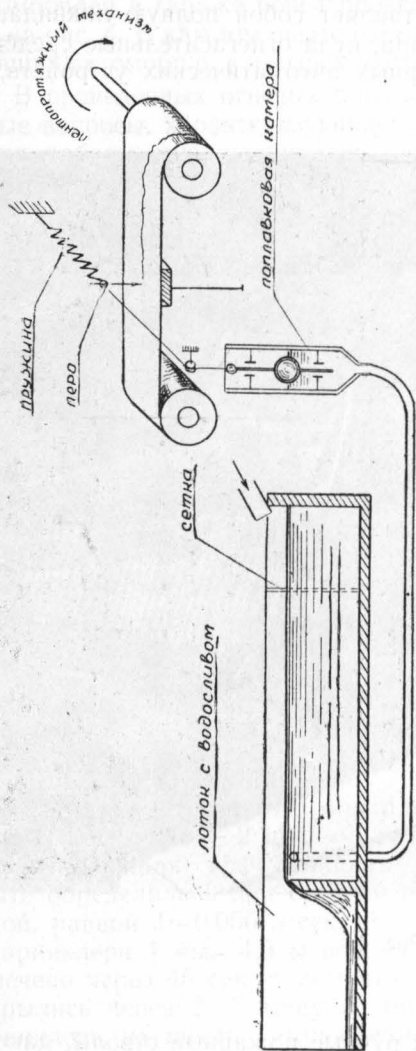


Рис. 2.

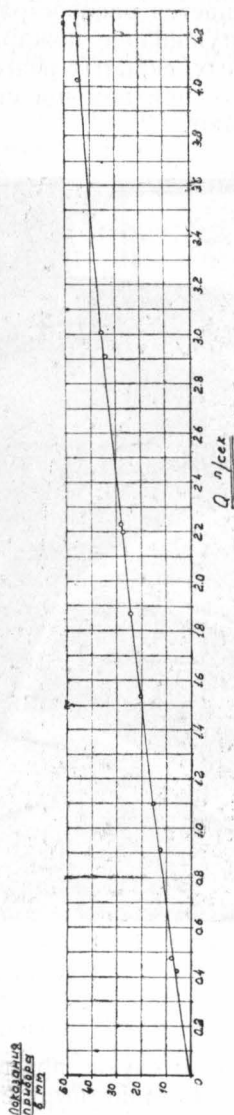


Рис. 3.

За локализацию пожара в данной работе принималось такое воздействие огнегасительных средств на очаг пожара, при котором прекращается распространение его и происходит основное тушение.

Дотушивание пожара представляет собой полную ликвидацию отдельных, скрытых очагов пожара, куда огнегасительные средства, поданные при помощи стационарных автоматических устройств, не проникают.

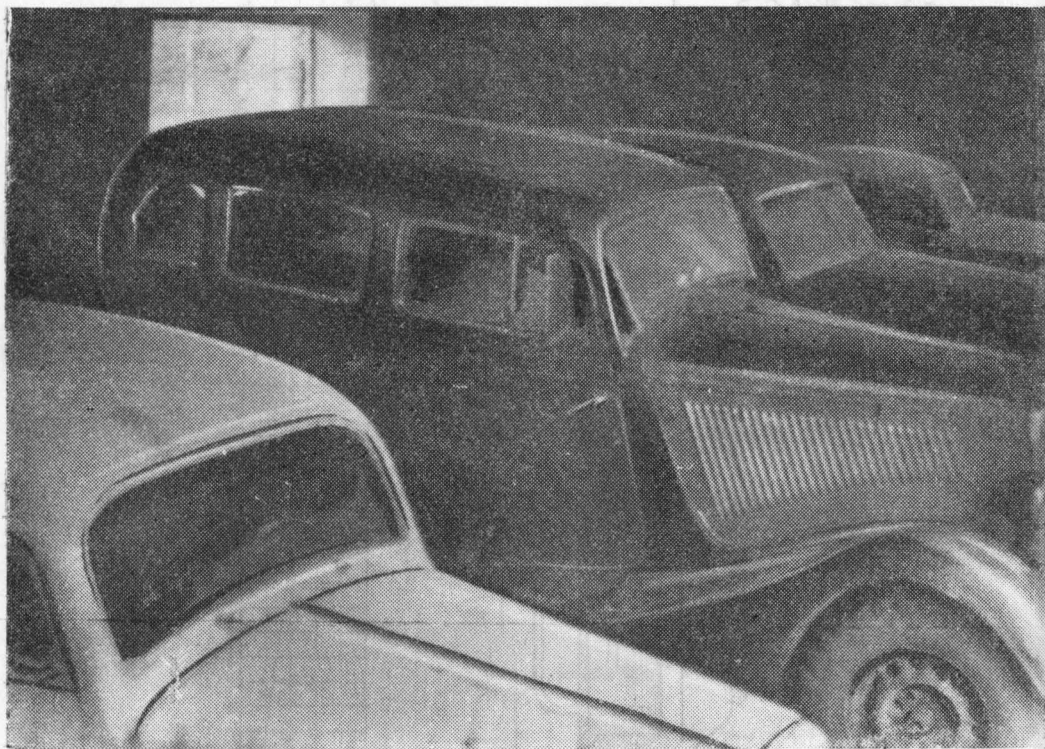


Рис. 4.

В этом случае применяются ручные пожарные стволы, дающие цельные (компактные) струи с расходом воды порядка 1—1,5 л/сек.

Для проведения каждого опыта брали четыре легковых автомобиля (марки автомобилей были различные). В соответствии с



нормами проектирования гаражей (Н113—54), автомобили устанавливались с интервалами от 0,7 до 1,0 м. Бензобаки автомобилей заполнялись бензином, картеры двигателей — автолом. Общий вид автомобилей в гараже перед проведением огневого опыта представлен на рис. 4. В каждом опыте одновременно поджигались два рядом стоящих автомобиля в четырех местах.

В проведенных огневых опытах выяснялись, в частности, некоторые вопросы, характеризующие огнегасящую эффективность и условия работы спринклерных и дренчерных систем, применительно к гаражам.

1. Эффективность действия спринклерных и дренчерных систем по тушению пожаров легковых автомобилей в гараже водой. При этом средняя интенсивность подачи воды принималась различной и была от  $J_1 = 0,031$  л/сек. м<sup>2</sup> до  $J_2 = 0,07$  л/сек. м<sup>2</sup> (соответственно расчетный напор у спринклера (дренчера) равнялся от 2,5 м вод. ст. до 4,9 м вод. ст.).

2. Расчетное и необходимое время для ликвидации пожара в гараже.

3. Возможность загорания рядом стоящих автомобилей от горящего, при принятых в опытах разрывах между автомобилями и действии спринклерных систем.

4. Аналогичные параметры эффективности спринклерных и дренчерных систем определялись при имитации «взрыва» бензобаков двух горящих автомобилей и разлития бензина в гараже, т. е. в более сложных условиях пожара.

## **Результаты огневых опытов по тушению пожаров легковых автомобилей в гараже**

### **Опыт 1.**

Для проведения этого опыта были взяты четыре автомобиля марок: «Москвич» — 2 шт., «Форд» — 1 и «М-1» — 1.

Огнегасящая эффективность спринклерных систем в данном опыте определялась при средней интенсивности орошения площади водой, равной  $J = 0,056$  л/сек м<sup>2</sup> и соответственно расчетный напор у спринклера 1 был 4,9 м вод. ст. Вскрытие первых спринклеров отмечено через 45 сек. с момента поджога автомобилей, остальные вскрылись через 2—3 минуты (всего в опыте вскрылось четыре спринклера из шести установленных в гараже). Неодновременное вскрытие спринклеров объясняется явлением местного нагрева до температуры вскрытия спринклера (+72°C). Тушение пожара автомобилей при опыте длилось 19 мин. 30 сек. За это время пожар был

локализован. На температурном графике (рис. 5) можно наблюдать средние температуры в зоне горения и в помещении гаража, до начала тушения и в момент тушения пожара, время свободного горения и тушения, точнее локализация пожара.

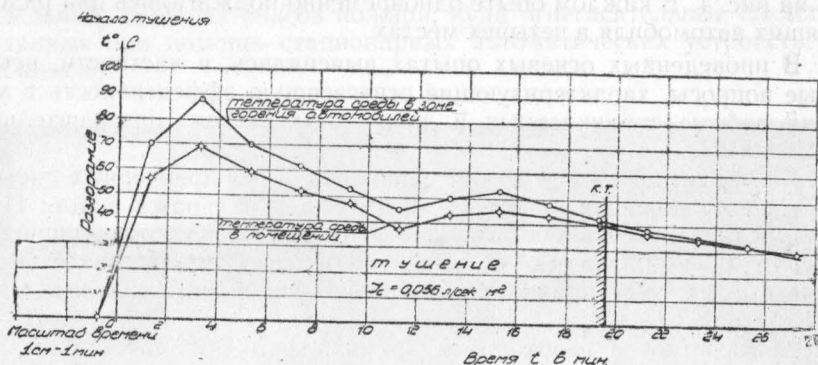


Рис. 5.

После прекращения подачи воды через спринклеры было произведено незначительное дотушивание слабо тлеющих очагов внутри кузова горевших автомобилей (в течение одной минуты при расходе воды из ручного ствола 0,7 л/сек.). Вода, отходящая из помещения гаража при тушении пожара, замерялась с помощью водомерного лотка и самопишущего прибора, температура воды — с помощью термометра.

Максимальная температура отходящей воды была равна  $+30^{\circ}$  (подаваемой на тушение около  $+20^{\circ}$  C).

В результате наблюдений за ходом тушения пожара автомобилей и после его установления, что в подожженных автомашинах «Москвич» и «Форд» — выгорела внутренняя обивка, сиденья потрескались и выпали стекла. В процессе тушения пожара водой орошались как горевшие, так и рядом стоящие автомобили.

С момента выпадения стекол в горевших автомашинах вода из спринклеров проникала внутрь кузовов, и горевшая обивка была в основном потушена. Вследствие прогрева штуцера и бензобака автомобиля «Форд» и нарушения пайки, произошло незначительное разлитие бензина, который смывался водой.

Рядом стоящие «Москвич» и «М-1» полностью сохранились и не имели повреждений от пожара. Всего израсходовано на тушение пожара автомобилей 4469 литров воды.

## Опыт 2.

В опыте 2 были использованы автомобили «ГАЗ-67», «М-1» (2 шт.) и «Москвич». Расстановка их в помещении была такой же как и в опыте 1.

Опытом 2 предусматривалось выявление эффективности действия спринклеров по тушению пожара автомобилей в гараже при средней интенсивности подачи воды 0,031 и 0,069 л/сек. м<sup>2</sup>. Напор у расчетного спринклера 1 соответственно был: 2,5 и 4,4 м вод. ст.

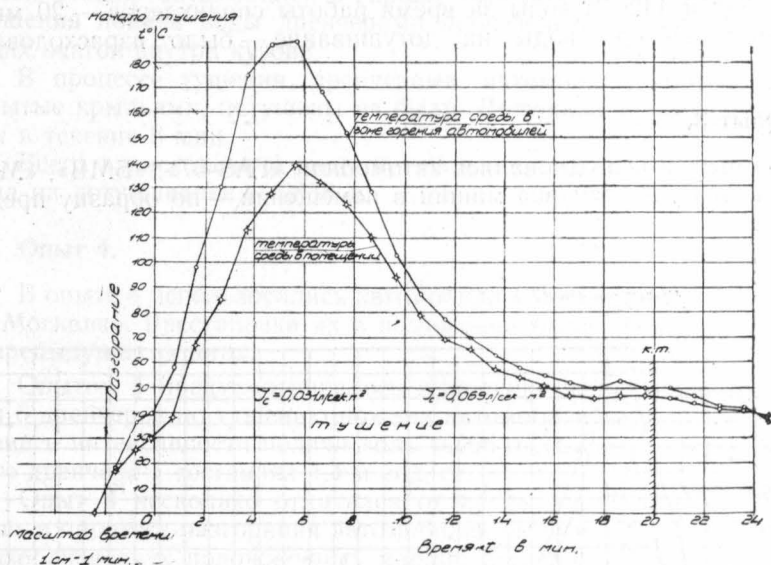


Рис. 6.

Вскрытие первых головок отмечено через 2 мин. 20 сек. с момента поджога, остальные вскрылись через 4—5 минут (всего в опыте работало 6 спринклеров). Это ясно из температурного графика (рис. 6).

Неодновременное вскрытие спринклеров, как и в опыте 1, объясняется явлением местного нагрева их.

В опыте 2 первые 8 мин. вода подавалась с интенсивностью 0,031 л/сек. м<sup>2</sup>, при которой не наблюдалось эффективного тушения пожара автомобилей. Остальные 12 минут вода подавалась с интенсивностью 0,069 л/сек. м<sup>2</sup>, в результате пожар в гараже был локализован. После прекращения подачи воды спринклерами произ-

ведено незначительное дотушивание слабо тлеющих очагов внутри кузова автомобилей (в течение 2 минут при расходе из ручного ствола 0,7 л/сек.). В результате пожара у «ГАЗ-67» и «М-1» выгорела обивка сидений, растрескались и выпали стекла, обгорели шины. Краска автомобиля «М-1», не подвергавшегося поджогу, вспучилась под влиянием теплового излучения от горящей автомашины.

В процессе тушения пожара наблюдалось значительное парообразование и задымление. Всего израсходовано на тушение пожара автомобилей 4426 л воды за время работы спринклеров — 20 мин., с учетом расхода воды на дотушивание — было израсходовано 4510 л.

### Опыт 3.

В опыте 3 использовались автомобили «ГАЗ-67», «БМВ», «М-1» и «Москвич». Рсстановка машин в помещении — по образцу предыдущих.

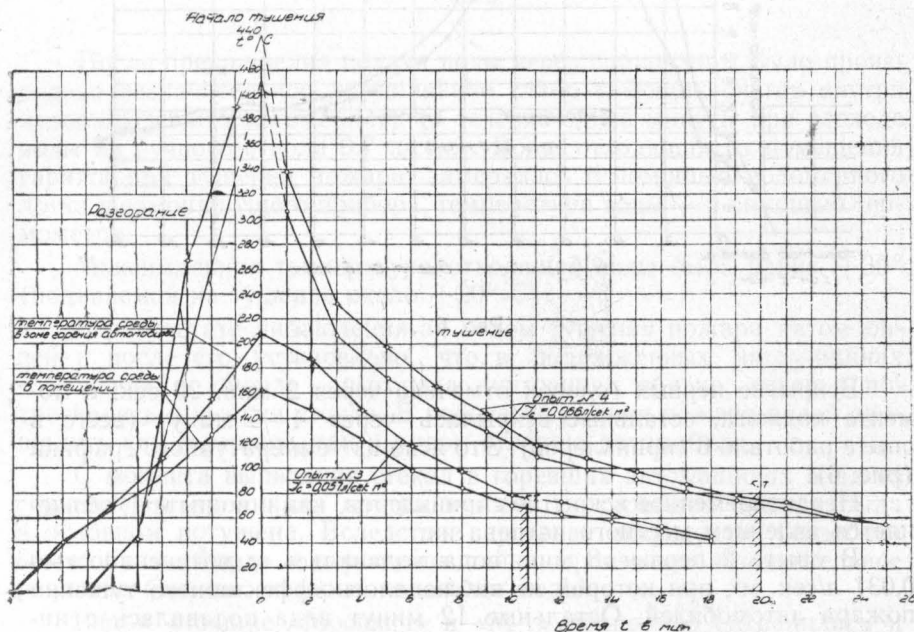


Рис. 7.

Опытом 3 предусматривалось выявление эффективности действия 6 дренчеров по тушению пожара автомобилей в гараже при ручном включении. Средняя интенсивность подаваемой воды была 0,058 л/сек. м<sup>2</sup>, а напор у расчетного дренчера составлял 4,2 м вод. ст. В остальных условиях проведения опыта 3 аналогичны с опытами 1 и 2. Время разгорания автомобилей длилось 10 минут. Температура в помещении к моменту тушения достигла +163° С (см. температурный график, рис. 7). Тушение пожара продолжалось 10 мин. 40 сек. Пожар автомобилей в гараже был локализован. После прекращения подачи воды дренчерами произведено дотушивание тлеющих очагов внутри кузова.

В процессе тушения дренчерами автомобиля «БМВ», шины, скрытые крыльями, потушены не были. Дотушивались ручным стволом в течение 8 мин.

Всего израсходовано воды на тушение 2502 л, а с учетом расхода на дотушивание — 2838 л.

#### Опыт 4.

В опыте 4 использовались автомобили «Москвич», «М-1» (2 шт.) и «Москвич». Расстановка их в помещении была произведена как и в предыдущих опытах.

Опытом 4 предусматривалось выявление эффективности действия 6 дренчеров по тушению пожара автомобилей при ручном включении и интенсивности подачи воды 0,066 л/сек. м<sup>2</sup>. Напор у расчетного дренчера 1 составлял 4,4 м вод. ст.

Опыт 4 несколько отличался от предыдущих опытов тем, что здесь в процессе разгорания автомобилей были имитированы взрывы бензобаков двух подожженных машин, а следовательно, произошло разлитие бензина.

Поджигались автомобили «Москвич» и «М-1», в которых устанавливались, помимо противней, 30-литровые емкости, полностью заполненные бензином. Через 5 минут от начала поджога автомобилей емкости были опрокинуты. Горящий бензин растекался по поверхности пола. Имитация взрыва бензобаков усилила интенсивность горения, которое сопровождалось обильным выделением дыма и пламени.

Через 7 минут от начала поджога температура в помещении перед началом тушения достигала +414° С (см. рис. 7).

При включении в работу 6 дренчеров горящий бензин смывался водой, стекая в сборные лотки, где и догорал (см. рис. 8).

В процессе разгорания растрескались и выпали стекла автомобилей, загорелись шины. Шина запасного колеса автомобиля «Мос-



квич», охваченная пламенем, выходящим из штуцера бензобака, продолжала гореть в процессе всего периода тушения.

После выключения дренчеров произведено дотушивание тлеющих очагов внутри кузова автомобилей и запасного колеса автомобиля «Москвич» струей воды из ручного ствола в течение 5 мин.

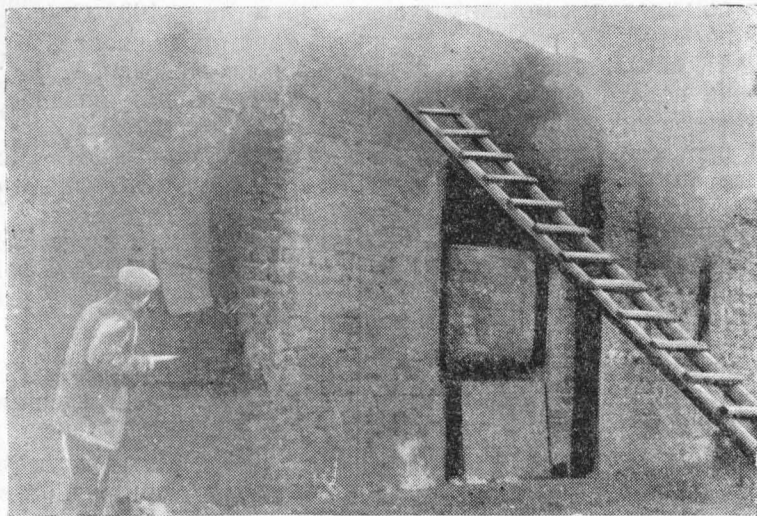


Рис. 8.

Тушение продолжалось 20 мин. Пожар автомобилей в гараже был локализован. Всего израсходовано на тушение, без учета расхода воды на дотушивание, 5352 л, а с учетом — 5562 л.

В результате воздействия пламени горящего автомобиля, в период разгорания, а также пламени разлившегося бензина, на рядом стоящий автомобиль «М-1», у последнего потрескались боковые стекла, произошло вспучивание краски по всей поверхности кузова. Обнаружено вспучивание краски автомобиля «Москвич» со стороны главного очага пожара.

#### Опыт 5.

В опыте 5 использовались автомобили «Москвич» — фургон, «Москвич» — кабриолет, «М-1» и «Москвич».

Расстановка их в помещении была произведена как и в предыдущих опытах.

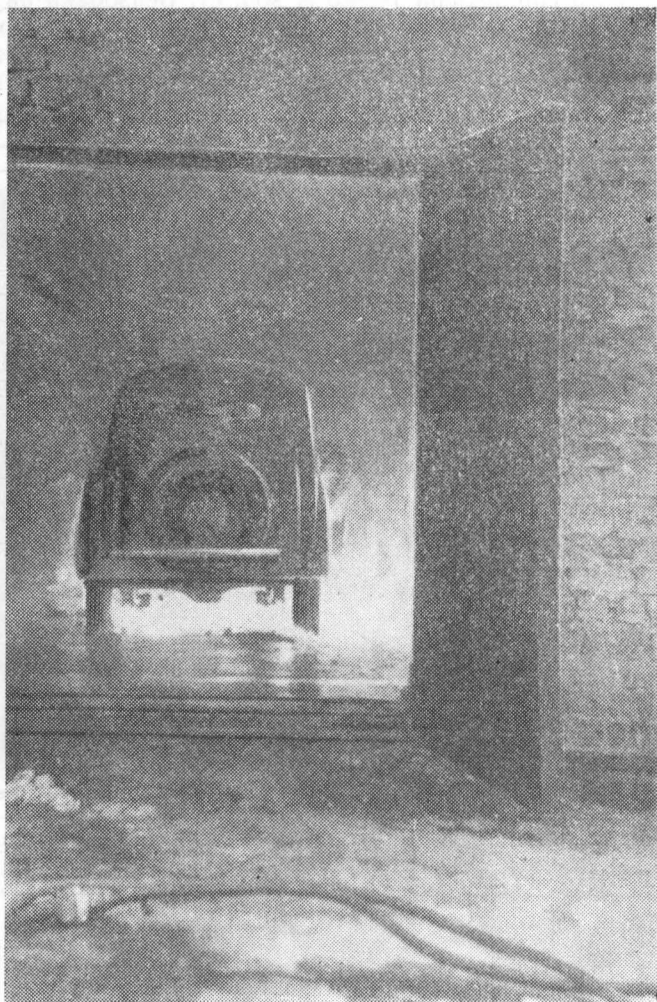


Рис. 9.

Опыт 5 предусматривалось выявление эффективности действия спринклеров по тушению пожара автомобилей при автоматическом срабатывании, при подаче воды интенсивностью  $0,07 \text{ л/сек. м}^2$ . Напор у расчетного спринклера 1—4,5 м вод. ст. Бензобаки автомобилей были заполнены бензином, картеры двигателей — автолом.

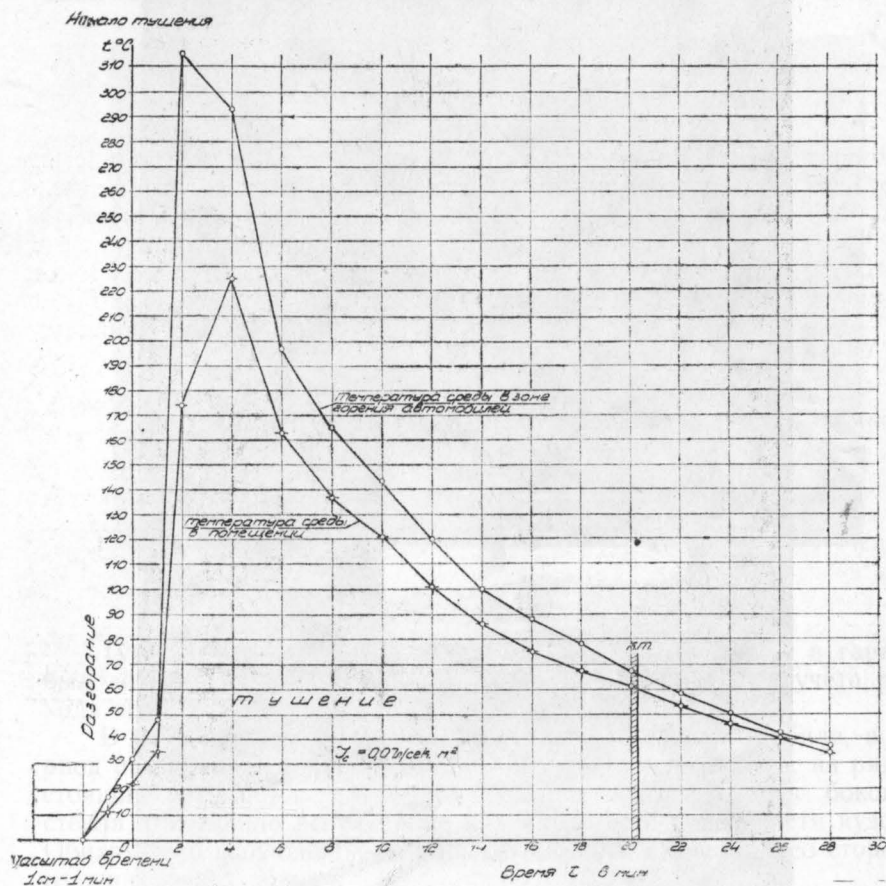


Рис. 10.

В опыте 5, как и в опыте 4, в процессе разгорания автомобилей были имитированы взрывы бензобаков. Поджигались автомобили «Москвич» — кабриолет, «Москвич» — фургон, в которых устанавливались, помимо противней, 30-литровые емкости, полностью запол-

ненные бензином. Через 6 минут от начала поджога автомобилей емкости были опрокинуты. Горящий бензин растекался по поверхности пола.

Имитация взрыва бензобаков усилила интенсивность горения, которое сопровождалось обильным выделением дыма и пламени (см. рис. 9).

Наиболее интенсивное горение отмечено у автомобиля «Москвич» — фургон, имевшего деревянный кузов.



Рис. 11

Вскрытие первых спринклеров отмечено через 2 минуты 10 секунд с момента поджога, остальные вскрылись через 4—6 минут (всего в опыте работало 6). Это ясно видно из температурного графика (рис. 10).

Как и в предыдущих опытах было отмечено одновременное вскрытие спринклеров.

В опыте 5 вода на тушение пожара автомобилей подавалась в течение 17 мин. 25 сек. с интенсивностью 0,07 л/сек.

Интенсивность подачи воды первых спринклеров, вскрывшихся через 2 мин. 10 сек., не определялась.

В результате пожара у автомобиля «Москвич» — фургон выгорела обивка сидений и кузов (см. рис. 11). В процессе тушения наблюдалось факельное горение паров бензина, выходящих из бензобака. У автомобиля «Москвич» — кабриолет также выгорела обивка сидений и кузова. Тент автомобиля, смачиваемый водой, полностью сохранился. Тушение пожара в опыте длилось 20 мин. 15 сек. За это время пожар был локализован. После прекращения подачи воды спринклерами произведено незначительное дотушивание слабо тлеющих очагов внутри кузова автомобилей.

Стоящие рядом «М-1» и «Москвич» подверглись воздействию пламени горящих автомобилей. Краска кузова «М-1» со стороны пожара обгорела, стекла, растрескавшиеся еще в опыте 4, выпали.

Всего израсходовано на тушение пожара автомобилей 5759 л воды из расчета подачи воды с интенсивностью 0,07 л/сек. м<sup>2</sup> в течение 20 мин. 15 сек.

Данные по тушению пожара в опытах 1, 2, 3, 4 и 5 приведены в таблице (см. стр. 39).

### Выводы

В результате проведенной работы необходимо сделать следующие выводы:

1. Огнегасящая эффективность существующих спринклерных и автоматически действующих дренчерных систем, обеспечивает полную локализацию возникшего пожара в гараже легковых автомобилей, после чего, как правило, необходимо производить дотушивание отдельных скрытых очагов горения ручными стволами, при этом расход воды может быть менее 3 л/сек.

2. Средняя величина интенсивности подачи воды через спринклеры или дренчеры в виде капельных (орошающих горящую поверхность) водяных струй, обеспечивающая огнегасящую эффективность, должна быть не менее 0,06 л/сек. м<sup>2</sup>, а расчетный напор при этом у угольника, в который ввернуты расчетные (наиболее удаленные и возвышенные по отношению к водопитателю) спринклер или дренчер, должен быть до 5,0 м вод. ст.

3. Время, необходимое для полного тушения, должно складываться из потребного времени на локализацию и затем на дотушивание пожара. По абсолютной величине оно является расчетным временем, которое должно быть положено в основу для определения мощности водопитателя и принимается в данном случае равным от 40 до 60 мин. Принятое расчетное время в ряде случаев может быть меньше потребного времени для ликвидации пожара, так как оно не включает ту часть, которая необходима для разбора горевших



## Результаты опытов по тушению пожаров легковых автомобилей в гараже

№№ опытов	Число легковых автомобилей в опыте шт.	Расстояние между автомобилями м	Время свободного течения, мин. сек.	Применяемое средство пожаротушения	Время тушения (локализации) пожара, мин. сек.	Время дотушивания пожара, мин., сек.	Число вскрытых спринклеров или включенных дренчеров, шт.	Напор у расчетного спринклера (дренчера), м вод. ст.	Расход воды, л/сек.	Максимальная температура среды, °С		Примечание
										в зоне горения	в помещении	
1	4	0,7—1,0	0'45"	Вода, подаваемая через спринклер То же	19'30"	1'00"	4	4,9	3,82	+ 88	+ 69	В течение 8 мин. расход был 2,14 и 12 мин. — 4,72
2	4	0,7—1,0	2'20"	То же	20'00"	2'00"	6	2,5 4,4	2,14 4,72	+ 188	+ 139	
3	4	0,7—1,0	10'00"	Вода, подаваемая через дренчер То же	10'40"	8'00"	6	4,2	3,91	+ 208	+ 162	Имитировался взрыв бензобака То же
4	4	0,7—1,0	7'00"	То же	20'00"	5'00"	6	4,4	4,46	+ 390	+ 326	
5	4	0,7—1,0	2'10"	Вода, подаваемая через спринклер	20'15"	1'00"	6	4,5	4,74	+ 315	+ 225	

\* Расход воды из ручного ствола при дотушивании не более 1—1,5 л/сек.

автомобилей, различных предметов и строительных конструкций гаража.

4. При загорании одного и более автомобилей, подготовленных к рейсу (баки заполнены бензином, а картеры — автолом), и при расстоянии между соседними автомобилями около 1 м, спринклерные и дренчерные системы предохраняют от загорания другие автомобили, находящиеся в гараже.

5. Помещение гаража должно иметь водостоки. Это обстоятельство в случае взрыва бензобаков и разлития бензина при пожаре автомобилей, может предохранить от загорания другие автомобили, горючие предметы и конструкции гаража, поскольку потоки смываемого и горящего бензина будут отведены водостоками.

6. В качестве противопожарных мероприятий в гаражах целесообразно предусматривать устройство водооросительной (спринклерной или дренчерной) системы.

При этом в зависимости от технико-экономических соображений (большие защищаемые площади, отсутствие или малая мощность водонисточника и др.), может быть принято спринклерование гаража, или устройство отдельных водозаградительных зон с открытыми водооросителями (дренчерами).

К. Т. Н. КУРБАТСКИЙ О. М.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ ЛЕСОБИРЖ

Под лесными биржами понимаются крупные склады лесной продукции различного характера.

Нормами строительного проектирования (Н-129—55) биржи подразделяются по хранимой продукции и способу ее укладки на:

1. Склады пиломатериалов (тес, доски, брусья);
2. Склады круглого леса при штабельном хранении;
3. Склады балансовой древесины и дров при кучевом хранении;
4. Склады щепы и древесных отходов.

Для дальнейшего рассмотрения вопроса целесообразно склады круглого леса, балансовой древесины, дров, объединить в группу — биржи круглого леса. Остальные склады будут относиться к биржам пиломатериалов. Это подразделение обуславливается различной степенью пожароопасности и различными условиями хранения.

По способу хранения древесины биржи подразделяются на склады сухого и влажного хранения. Биржи пиломатериалов являются складами только сухого хранения. Продукция на эти склады отправляется в просушенном виде или для сушки в процессе хранения.

Для улучшения условий проветривания штабелей в них при укладке досок создают вертикальные воздушные каналы, которые при пожаре становятся опасными тяговыми трубами, резко увеличивающими интенсивность горения. Наличие у штабелей досок высокоразвитой поверхности, при неплотной укладке, обеспечивает хорошие условия для горения в любое время года.

Круглый лесоматериал в зависимости от назначения и местных условий может содержаться при сухом и влажном хранении.

При сухом хранении ряды бревен укладываются в штабелях на прокладках, благодаря чему достигается свободное проникновение

воздуха внутрь штабеля и просыхание всего массива. Такое хранение круглого леса представляет высокую пожарную опасность, хотя и меньшую, чем для пиломатериалов.

Пожарная опасность, как с точки зрения возможности загорания, так и скорости распространения огня, уменьшается лишь для круглого леса при влажном хранении, которое обеспечивается плотной укладкой древесины, сохранением на ней коры, дополнительным увлажнением, орошением и защитой торцов от просыхания. Однако такое хранение возможно не во всех случаях. На целлюлозно-бумажных предприятиях для сырья (баланса) возможно лишь сухое хранение.

Скопление на биржах большого количества легкосгораемого материала может вызвать и вызывает крупные пожары, которые в ряде случаев носили характер стихийного бедствия. По площади горения они могут сравнены с пожарами лесов, степей или пожаров городов во время военных действий, а по интенсивности горения, количеству выделяемого тепла — даже превосходят их.

За период 1950—57 гг. произошло 11 крупных пожаров лесобирж. При этом сумма только прямых убытков (стоимость сгоревших лесоматериалов) составила 38 млн. рублей.

Однако до настоящего времени не проводилось каких-либо значительных работ по исследованию вопросов горения и тушения лесобирж.

К попытке обобщения и анализа особенностей реальных пожаров лесобирж может быть отнесена лишь статья т. Савкова, опубликованная в журнале «Пожарное дело» № 6 за 1955 г.

Литературные данные о работе в области предупреждения и тушения пожаров лесобирж за границей отсутствуют, хотя во время поездки советской делегации в Финляндию стало известно, что там начаты подобные работы и получены результаты по нормам расхода воды и тактике тушения.

Излагаемый в настоящей статье материал получен на основе анализа описаний пожаров, личных впечатлений некоторых участников их тушения в Свердловской и Архангельской областях, а также материалов Свердловской пожарно-испытательной станции.

Материалы по описанию и обработке пожаров сведены в таблицу № 1, из которой видно, что пожары лесобирж прежде всего характеризуются значительной площадью горения, достигающей 20—30 гектаров. Наличие большого незастресненного пространства по периметру пожара обеспечивает равномерность притока больших воздушных масс, что в свою очередь способствует образованию вихря в зоне горения. Приток воздуха в зону настолько велик, что были случаи, когда он сбивал людей с ног. Вихревые потоки увле-

кают с пожара раскаленные частицы горючего материала, а иногда и целые доски, и перебрасывают их на сотни метров, создавая новые очаги пожара. Вот как описывается один из пожаров биржи пиломатериалов.

«С увеличением площади горения значительно возрастал ветер, достигая ураганной силы. Одним из порывов ветра сорвало крышу с сортировочной площадки завода и свалило с ног нескольких бойцов пожарной охраны и рабочих.

В центре горящей биржи стали образовываться огненные смерчи. Отдельные смерчи постепенно сливались в один, который с колоссальной силой двигался к концу биржи. Сила смерча была настолько велика, что горящие доски поднимались в воздух на высоту 70—100 м. В результате такого смерча была засыпана досками половина разрыва между биржей и поселком... Достигнув рабочего поселка, смерч покрывал его сплошным огненным дождем. При этом небольшие строения, расположенные на окраине поселка, частично были охвачены огнем, частью разрушены, так как их крыши были подняты в воздух».

Большие массы горючего материала (высота штабелей достигает 12 м) обеспечивает большую интенсивность горения, что, в свою очередь, обуславливает появление сильной тепловой радиации. Величина лучистой теплоты настолько велика, что были случаи, когда на расстоянии 150—200 м на автомашинах вздувалась краска, загорались деревянные строения, отстоящие от очага пожара на 60—80 м.

Значительное тепловыделение вызывает высокую скорость распространения огня, которая зависит от многих факторов и, в первую очередь, от вида и влажности материала, способа его укладки, направления ветра, а также интенсивности подачи воды при тушении.

Скорость распространения огня на пожарах лесобирж, характеризуется ростом площади и периметра очага пожара см. графы 10 и 11 сводной таблицы. Эти скорости являются осредненными по времени, так как в качестве площади пожара (графа 7) бралась территория сгоревшей биржи или ее части.

Из сопоставления данных можно сделать вывод, что скорости распространения огня на складах пиломатериалов более, чем в десять раз превышают скорости распространения огня на складах круглого леса. Так, на трех пожарах (6, 9 и 11) рост площади составил 1650—2750 м<sup>2</sup>/мин., а рост периметра — 15,5—19,0 м/мин. Наибольшие значения этих величин для пожара круглого леса составляют соответственно 252 м<sup>2</sup>/мин. и 10,3 м/мин. (пожар 8), а средние величины равны соответственно 40—50 м<sup>2</sup>/мин. и 2—5 м/мин. Увеличение скорости распространения огня на пожаре 8



Сводная таблица

№№ пожаров	Дата	Материалы и его количество м <sup>3</sup>	Результаты тушения	Результаты пожара		Площадь пожара, м <sup>2</sup>
				количество сгоревшей древесины м <sup>3</sup>	прямые убытки тыс. руб.	
1	2	3	4	5	6	7
1	19 мая 1950 года	Круглый лес и дрова 500000	потушен	нет данных	879	2600
2	3 октября 1950 года	Пиломатериалы (брус и шпалы)	потушен	10000	500	2500
3	20 апреля 1951 года	Пень и бревна березовые, 14000	не потушен	сгорела полностью	—	30000
4	31 августа 1951 года	Круглый лес, 107700	не потушен	сгорела полностью	6784	51700
5	10 октября 1951 года	Дрова и деловая древесина 5746 (на сгоревшем участке)	не потушен (на участке)	на участке сгорела полностью	220	9000

Таблица № 1

## пожаров лесобирж

Периметр пожара, м	Время распространения огня на всю площадь, час., мин.	Скорость распространения огня			Общий расход воды по этапам л/сек.	Интенсивность подачи воды по этапам			Примечание
		рост площади м <sup>2</sup> /мин. $V_{\omega}$	рост периметра м/мин. $V_{\Pi}$	средняя линейная скорость м/мин.		по площади л/сек. на м <sup>2</sup>	по периметру л/сек. на погонный метр	по основному фронту л/сек. на погонный метр	
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
300	0—50	52,0	6,0	0,36	14,0 45,5 66,5	0,200 0,035 0,026	0,41 0,18 0,22	0,65	
290	0—45	55,5	6,5	0,35	10,5 73,5	0,0066 0,0293	0,053 0,252	0,36	Направление ветра препятствовало распространению огня на площадь биржи
700	4—25	113,0	2,5	0,34	3,5 35,0	— 0,025	— 0,068	—	
790	4—10	208,0	3,2	0,23	21,0 65,5 112,5	0,028 0,030 0,0022	0,06 0,086 0,142	0,27	
400	3—05	50,0	1,7	0,32	17,5 49,0 79,5	— 0,03 0,009	— 0,3 0,21	0,7	Пожар был локализован в пределах участка лесобиржи (60—80 м от соседних)

№№ пожаров	Дата	Материалы и его количество м³	Результаты тушения	Результаты пожара		Площадь пожара, м²
				количество сгоревшей древесины м³	прямые убытки тыс. руб.	
1	2	3	4	5	6	7
6	28 июля 1951 года	Пиломатериал (преимущественно доски) 49325	не потушен	сгорела полностью	12000	120000
7	29 мая 1952 года	Долготье (длинные дрова), 104000	не потушен	сгорела полностью	6247	59000
8	9 сентября 1953 года	Круглый лес 40000	потушен	1961	180	4900
9	15 июня 1954 года	Пиломатериалы (доски) 57000	не потушен	сгорела полностью	12000	330000
10	9 мая 1957 года	Круглый лес 18000	потушен	около 600	51,1	2000
11	1941 года	Пиломатериалы (доски) 120000	не потушен	сгорела полностью	—	395000

Периметр пожара, м	Время распространения огня на всю площадь, час., мин.	Скорость распространения огня			Общий расход воды по этапам л/сек.	Интенсивность подачи воды по этапам			Примечание
		рост площади м <sup>2</sup> /мин. $V_w$	рост периметра м/мин $V_n$	средняя линейная скорость м/мин.		по площади л/сек. на м <sup>2</sup>	по периметру л/сек. на погонный метр	по основному фронту л/сек. на погонный метр	
8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1550	1—20	1650	18,2	2,3	21,0 14,0	0,0043 0,00095	0,075 0,025	0,47 0,17	На втором этапе тушения часть стволов была переставлена на защиту поселка
960	—	—	—	—	10,5 14,5 88,5 98,0	— — 0,0019 0,0016	— — 0,098 0,102	—	
300	1—10	252	10,3	0,68	14,0 120,0	0,04 0,025	0,12 0,40	1,36	Наблюдался ветер со скоростью 14 м/сек в стороны биржи от места возникновения пожара
2300	2—00	2750	19,0	2,4	28,0 52,5 62,5	0,093 0,0088 0,0028	0,44 0,043 0,030	0,56 0,105 0,13	
218	2—55	8	0,7	0,13	38,0 49,5	0,024 0,025	0,21 0,23	—	Влажность древесины 40—50%
2560	2—45	2400	15,5	1,87	28,0 56,0 63,0 119,0	0,0003	0,046		

можно объяснить сильным ветром, который достигал скорости 14 м/сек. Наоборот, сравнительно малые скорости распространения огня на пожаре пиломатериала (пожар 2) можно объяснить тем, что во-первых, загорание произошло в крайнем штабеле биржи, а направление ветра препятствовало его распространению в сторону биржи. Во-вторых, пиломатериалом являлся брус и шпалы, а не доски, как в случаях пожаров 6 и 9 (стр. 43). В-третьих, были обеспечена интенсивная подача воды, пожар был потушен.

Рассмотренные скорости роста площади и периметра не дают представления о линейной скорости распространения огня. Осредненная линейная скорость распространения огня может быть получена по формуле:

$$V_l = \frac{2 \omega}{\pi t}$$

где:  $\omega$  — площадь пожара;

$\pi$  — периметр пожара;

$t$  — время распространения огня на площадь  $\omega$ .

При этом для подсчета условно было принято равномерное распространение огня во все стороны.

Приведенные в графе 12 значения  $V_l$  имеют более устойчивые величины нежели  $V_{\omega}$  и  $V_{\pi}$ . Для бирж пиломатериалов  $V_l = 1,87 - 2,4$  м/мин., а для бирж круглого леса  $V_l = 0,23 - 0,36$  м/мин. Только в случае резко выраженного одностороннего развития пожара приведенные величины для бирж круглого леса увеличиваются до 0,68 (пожар 8) или уменьшаются в случае большой влажности древесины и интенсивного тушения до 0,13 (пожар 10).

Все приведенные величины скоростей распространения огня являются средними во времени, поскольку скорость нарастания площади или периметра, вероятно, будет больше у развившегося пожара, нежели в самом его начале. Однако средние величины скоростей в известной мере дают возможность не только оценить пожары лесобирж, но и выяснить количество потребной для тушения воды и техники, если известна интенсивность ее подачи.

На основании анализа имевшихся материалов была сделана попытка определить величину интенсивности подачи воды \*). Эта величина определялась на единицу площади и на единицу периметра. Очевидно, что при развившемся пожаре будет иметь практическое значение только интенсивность подачи воды по фронту огня, а в на-

\*) При вычислении интенсивности принимались следующие расходы из стволов: литер «Б» — 3,5 л/сек.,  
литер «А» — 7,0 л/сек.,  
лафетного — 15 л/сек.



чале, когда небольшая его площадь перекрывается струями, интенсивность подачи по площади.

Приведенные в графах 14 и 15 значения интенсивности подачи воды не освещают истинного положения при тушении пожара, поскольку расстановка сил редко бывает равномерной по всему периметру. Значения этих величин чаще для большинства пожаров уменьшаются по мере их развития, что указывает не только на недостаточность вводимых средств, но и на превышение скорости распространения огня над скоростью наращивания средств тушения.

Однако данное положение было бы вполне справедливым только для случая равномерного роста площади пожара во все стороны и при равномерном распределении сил и средств тушения. Практически почти всегда можно выявить наиболее опасный, основной фронт развития пожара, на котором сосредоточивается наибольшее количество прибывающих средств. По интенсивности подачи воды на этом участке и результату тушения уже можно судить о величине некоторой эффективной интенсивности \*).

Прежде чем говорить об эффективной интенсивности, следует указать, что из одиннадцати приведенных пожаров четыре оказались потушенными (1, 2, 8, 10), на одном (5) удалось предотвратить распространение огня с участка на всю биржу (расстояние между участками в направлении ветра 60—80 м). Не потушено 6 пожаров.

Из потушенных пожаров десятый был ликвидирован в основном за счет большой влажности древесины (40—50 %), что обеспечило сравнительно малую скорость распространения огня ( $V_f=0,13$  м/сек). Интенсивность подачи воды составляла 0,21—0,23 л/сек. на погонный метр по всему периметру равномерно, поскольку основной фронт не наметился. При втором пожаре тушению благоприятствовало то, что загорание произошло в крайнем штабеле и направление ветра было со стороны биржи. В связи с этим основной фронт тушения был организован по длине загоревшегося штабеля со стороны соседнего (расстояние 3 м) и с краев горевшего. Интенсивность подачи воды, обеспечивающая тушение, достигала 0,36 л/сек. на погонный метр.

Два других потушенных пожара (пожары 1 и 8) произошли в более жестких условиях с точки зрения направления ветра, хотя оба они начались с края биржи.

Особый интерес представляет пожар 8, поскольку сильный ветер со скоростью 14 м/сек. угрожал распространить огонь на всю биржу. Быстрое наращивание средств пожаротушения и доведение интенсивности подачи воды до 1,36 л/сек. на погонный метр основного

---

\*) Под эффективной интенсивностью понимается минимальное значение интенсивности, при которой возможна локализация пожара.

фронта позволили остановить продвижение огня, локализовать пожар, а затем перейти в наступление и окончательно потушить. Успешному тушению такого сложного пожара способствовала правильная тактика, согласно которой был выбран основной фронт и на некотором расстоянии от огня был подготовлен рубеж обороны \*).

По имеющимся сведениям, в Финляндии для подготовки рубежа обороны используется взрывной метод развалки штабелей. Для этого заряд взрывчатого вещества подкладывают под подгоревшие уже штабели и взрывом их сваливают в сторону огня.

Следует отметить, что вопросы, связанные с условиями образования эффективного рубежа обороны (размеры, способы быстрого создания и др.) остаются у нас еще мало изученными.

Тактика организации рубежа обороны была использована и при тушении пожара 1, для которого интенсивность подачи воды по основному фронту огня составила 0,65 л/сек. на погонный метр. Уменьшение интенсивности подачи воды по сравнению с предыдущим пожаром можно объяснить менее жесткими условиями его развития. Направление ветра для данного пожара составляло приблизительно  $15^\circ$  к фронту распространения огня (пожар начался с края биржи).

Таким образом интенсивность подачи воды, при благоприятных условиях развития пожара, составила 0,23—0,36 л/сек. на погонный метр для тушения шпал и брусьев, которые условно можно отнести также к круглому лесу. В средних условиях тушения интенсивность подачи воды составила 0,65, а в наиболее трудных — 1,36 л/сек. на погонный метр. Причем, судя по описанию пожара, перелом в тушении произошел очень быстро после введения дополнительных стволов и повышения интенсивности до 1,36 л/сек. на погонный метр. Поэтому весьма вероятно, что локализация пожара могла бы наступить и при меньшей интенсивности.

Для сравнения полученных результатов по интенсивности подачи воды можно привести некоторые имеющиеся зарубежные данные. Так, в докладе финского пожарного инспектора (1957 г.) \*\*) указывалось, что по его расчетам распространение огня на биржах круглого леса можно остановить, если подавать воду в количестве 50 л/мин. на каждый погонный метр фронта пожара, что составляет 0,83 л/сек. на погонный метр. Как видно, это значение лежит в пределах полученных данных для пожаров при средних и тяжелых условиях тушения.

\*) Под рубежом обороны понимается полоса по длине фронта сгня, освобожденная от горючего материала.

\*\*) Данные сообщены т. Возяковым В. А., присутствовавшим на докладе.

Для пиломатериалов (доски) не удалось получить значения эффективной интенсивности, поскольку ни один пожар потушен не был. При пожарах лесобирж пиломатериалов интенсивность по фронту достигала величин 0,47 (пожар 6) и 0,56 л/сек на погонный метр (пожар 9), но оказалась недостаточной для локализации.

Необходимо отметить, что значение эффективной интенсивности зависит в большой мере от способа подачи воды. Если подавать воду только стволами литер «Б», то значение эффективной интенсивности будет больше, чем при подаче воды стволами литер «А» или лафетными. Это объясняется действием лучистой теплоты, затрудняющей близкий подход к фронту огня, и мощными вертикальными потоками воздуха, уносящими воду из распыленной части струи.

В выводах описаний большинства пожаров как особый недостаток тушения отмечается отсутствие мощных лафетных стволов. Примеры удачно потушенных пожаров (1 и 8) подтверждают это положение, так как в обоих случаях тушения, наряду со стволами литер «А», вода подавалась и из лафетных стволов. При тушении пожара 8 ствольщики лафетных стволов прикрывались распыленными струями из стволов «РС». В описании по этому поводу указывается: «Введенные в действие лафетные стволы (3 шт.) имели решающее значение по ликвидации пожара и защите смежных штабелей леса. Успешное тушение стало возможным только после создания водяных завес для ствольщиков, что позволило работать со всеми стволами на предельно близких расстояниях».

Значительный интерес могла бы представить величина полного объема воды, израсходованного на тушение пожаров. Однако в описаниях отсутствуют необходимые данные для его подсчета, особенно по периоду тушения после локализации. Только в описании пожара 8 дается полный объем воды, израсходованной на тушение и равный 817 м<sup>3</sup>. Если учесть, что площадь пожара равна 4 900 м<sup>2</sup>, а количество сгоревшей древесины составило 1 961 м<sup>3</sup>, то для тушения 1 м<sup>3</sup> древесины было израсходовано 0,42 м<sup>3</sup> воды. На каждый квадратный метр площади подано в среднем 0,167 м<sup>3</sup> воды. Высота штабелей на этой площади составляла 2—4 метра.

На основании изучения пожаров лесобирж могут быть сделаны некоторые выводы.

1) Запущенные пожары лесобирж отличаются большой площадью горения и значительной скоростью распространения (33 га было охвачено огнем за 2 часа). В ряде случаев образуются огневые вихри, усложняющие обстановку тушения. Возникающая на пожарах тепловая радиация вызывает загорание древесных материалов на расстоянии 60—80 м. Особо высокой интенсивности горения и вих-

реобразования отличаются пожары складов сухих пиломатериалов (доски, тес).

2) Основной причиной запущенных пожаров является малая интенсивность подачи воды в начальный период тушения. Как правило, в рассмотренных пожарах через 10—25 минут после их обнаружения прибывшими автонасосами подавалось на тушение не более 20 л/сек. воды.

3) Основной причиной неудачи в тушении пожаров лесобирж является превышение скорости распространения над скоростью наращивания сил и средств, что особенно относится к пожарам лесобирж пиломатериалов.

4) Повышенная влажность хранимой древесины в значительной степени уменьшает скорость распространения огня. Так, влажность древесины в 50—60% снизила скорость распространения огня до 0,13 против 0,34 м/мин. для древесины, хранимой в обычных условиях влажности. Повышенная влажность древесины уменьшает величину интенсивности подачи воды, требуемой для локализации пожара.

5) При тушении пожаров лесобирж, особенно развившихся, наибольший эффект тушения оказывают лафетные стволы при максимальном приближении ствольчиков к очагу горения. С этой целью должна быть обеспечена их защита от действия тепловой радиации. Обоснование производительности лафетного ствола дано в приложении.

6) Для эффективного тушения развившихся пожаров лесобирж следует устраивать специальные разрывы в сплошном массиве лесоматериалов перед фронтом движущегося огня.

7) Предусмотренные нормами разрывы (в том числе и пожарные) являются неэффективными, так как возникающая при пожаре тепловая радиация настолько сильна, что даже пожарный разрыв в 25 м не защищает от загорания смежные группы штабелей.

### Обоснование производительности лафетного ствола для тушения пожаров лесобирж

На выбор производительности лафетного ствола оказывают влияние такие факторы, как интенсивность подачи воды, радиус действия компактной части струи, мощность и количество насосов, питающих этот ствол и другие.

Для тушения крупных пожаров, какими являются пожары лесобирж, целесообразно иметь мощные стволы с большой производительностью и значительным радиусом действия. Однако, совершенно очевидно, что с тактической точки зрения имеется предел увеличения производительности, поскольку большая мощность, сосредоточенная в одном месте, ухудшает маневренность тушения. Кроме того, радиус действия струи растет медленнее, чем расход, и наступит такой момент, когда по расходу потребуется фронт тушения, который не может быть обслужен из-за недостаточной величины компактной части струи.

Последнее соображение явилось основой определения предельной величины производительности лафетного ствола, которое дается ниже. На основании результатов анализа принимается, что эффективная интенсивность подачи воды должна составлять 1,0 л/сек. на каждый погонный метр фронта огня. Тушение же крайних точек фронта производится концом компактной части струи, т. е. расстояние до них составляет  $R_K$  (рис. 1, схема). Радиус действия компактной части струи определяется:

$$R_K = \sqrt{L^2 + a^2}.$$

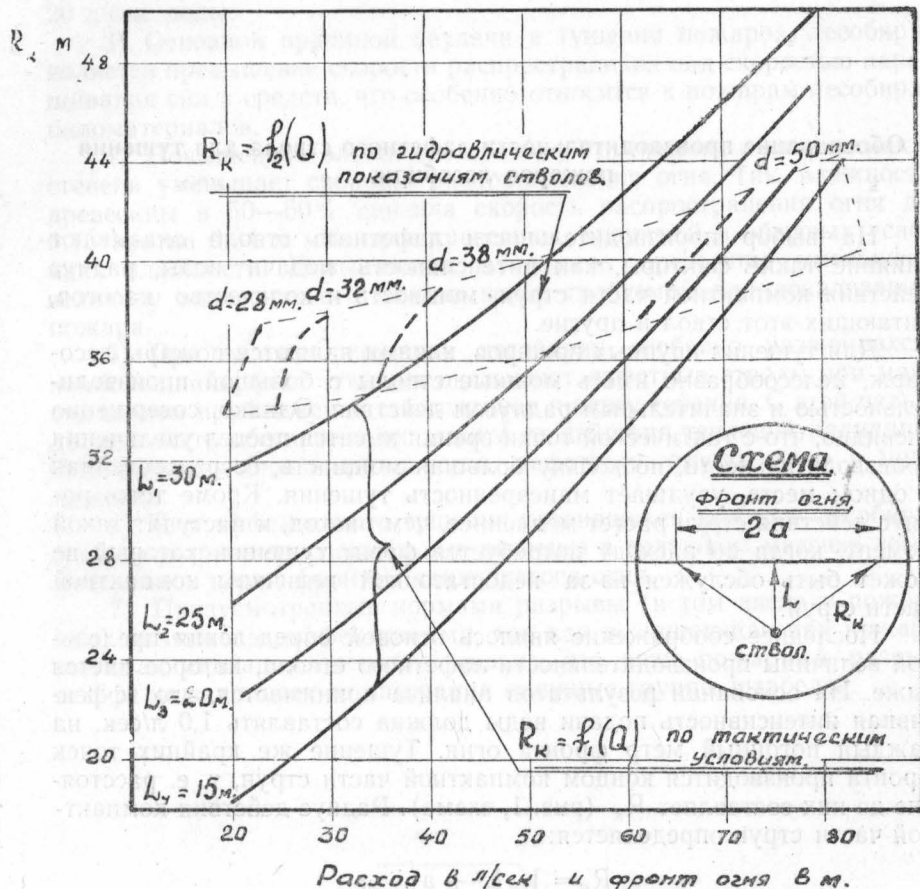
Производительность ствола будет равна:

$$Q = 1 \text{ л/сек.} \cdot 2a = 2a.$$

Задаваясь различными значениями  $a$  и  $L$  (15, 20, 25 и 30 м), можно получить серию кривых  $R_K = f_1(Q)$ .



С другой стороны, для лафетного ствола с различными насадками имеются свои зависимости  $R_K = f_2(Q)$ . На рис. 1 приведены серии кривых  $R_K = f_1(Q)$  построенные по тактическим соображениям, изложенным выше, и кривые  $R_K = f_2(Q)$  — по гидравлическим показателям лафетных стволов (лит. 12) для напоров в пределах 50—70 м, выделенных пунктиром.



Из рассмотрения графика следует, что с кривыми  $R_K = f_1(Q)$  пересекается лишь часть зоны, отвечающей насадкам примерно с 44 до 52 мм. Увеличение диаметра насадка свыше 52 мм нецелесообразно, так как в этом случае тушение пожара необходимо будет

производить с расстояния  $L=15$  м, поскольку в противном случае будет иметь место более высокая интенсивность подачи воды, чем заданная.

Кроме этого, с увеличением диаметра насадка увеличивается фронт тушения, что может вызвать определенные трудности в управлении стволом. Это обстоятельство также будет препятствовать повышению мощности ствола.

Большое значение на выбор производительности ствола окажет возможность обеспечения его водой существующими пожарными автонасосами.

На основании изложенного следует принять для разработки конструкцию лафетного ствола с диаметрами насадков в пределах 44—52 мм.

Окончательное решение вопроса о производительности может быть дано только после проведения соответствующих огневых и гидравлических испытаний ствола с пожарными автонасосами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов В. Б., Противопожарное водоснабжение на объектах лесной промышленности, 1957 г.
2. Вакин, Руководство по хранению круглого леса хвойных пород.
3. Вакин, Древесиноведение.
4. Голубев С. Г., Каляев С. В., Зильберштейн Ф. Б., Пожарная тактика, 1942 и 1947 гг.
5. Коперин, Вопросы теории хранения древесины, Архангельский лесотехнический институт им. Куйбышева, научно-исследовательский сектор, выпуск XXV, 1941 г.
6. Кузнецов А. И. Лесное товароведение.
7. Ляшедько М., Носов И., На лесобиржах Архангельской области, ж. «Пожарное дело», № 11, 1958 г.
8. Перелыгин П. М., Древесиноведение.
9. Противопожарные нормы строительного проектирования складов лесных материалов Н — 129—55.
10. Савков Е., Тушение пожаров на лесобиржах круглого леса, ж. «Пожарное дело», № 6, 1955 г.
11. Свердловская ПИС, Информационное письмо № 2 О возможности понижения пожарной опасности бирж и складов круглого леса путем искусственного дождевания.
12. Тарасов-Агалаков Н. А., Практическая гидравлика в пожарном деле.
13. Требизов Н. П., Пожарная тактика, 1928 г.

К. х. н. ЛОСЕВ В. П.  
инж. КАЗАКОВ М. В.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИНЕРЕЗИСА ВОЗДУШНО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕНЫ ИЗ ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЯ ПО-1

### Введение

Для тушения пожаров легковоспламеняющихся жидкостей широкое применение находит воздушно-механическая пена.

Слой ее, нанесенный на горящую поверхность, препятствует поступлению паров горючей жидкости в зону горения и, оказывая изолирующее действие, способствует снижению интенсивности огня. Кроме того, пена как неустойчивая коллоидная система, в процессе старения подвергается разрушению, в результате чего из нее выделяется жидкая дисперсионная среда — отсек, которая действует охлаждающе на поверхностный слой горячей жидкости и этим снижает упругость паров горючего. Таким образом, огнетушащая способность пены проявляется в ее изолирующем и охлаждающем действиях.

Для качественной характеристики пены в практике введено понятие устойчивости или стойкости, т. е. способности ее сохранять свои первоначальные свойства во времени. В зависимости от этого пены подразделяют на стойкие и нестойкие. Применяемые в огнетушащих целях, они должны обладать максимальной устойчивостью. Этот показатель является для них определяющим. К оценке устойчивости пен можно подходить с различных точек зрения, и в соответствии с этим в лабораторной и производственной практике находят применение различные методы ее определения.

Процесс разрушения столба пены, заключенного в определенном объеме, наступает для воздушно-механической пены при переходе ее из состояния концентрированной эмульсии в структурированную систему с жестким пенным каркасом (1).

Действующий в настоящее время ГОСТ 6948—54 на пенообразователь ПО-1 предусматривает определение устойчивости пены по времени разрушения 20 % ее по высоте столба. Пену получают путем

встряхивания 100 мл пенообразователя в стеклянном градуированном цилиндре емкостью в 1 л. Встряхивание производится вручную в течение 30 секунд. Получаемые результаты, характеризующие устойчивость пены, в этом случае имеют плохую воспроизводимость и не дают достаточно надежных показателей, характеризующих качество пены. Кроме этого при встряхивании цилиндра вручную неизбежно имеет место субъективная ошибка, зависящая от навыка и силы экспериментатора, получающего пену. Учитывая также, что огнетушащей способностью пена обладает лишь в состоянии концентрированной эмульсии, оценка ее качества по разрушению 20% столба пены не является показательной.

Наиболее простым, быстрым и достаточно надежным методом определения устойчивости пены является исследование процесса ее старения во времени, характеризуемого количеством выделившейся из пены жидкой дисперсионной среды — отсека.

В процессе разрушения пена претерпевает качественные и количественные изменения. С одной стороны, изменяется ее дисперсность и уменьшается количество пузырьков, составляющих пену, с другой — становятся тоньше пленки пузырьков. В результате из пены выделяется жидкая дисперсионная среда — отсек, т. е. происходит явление синерезиса. Таким образом, скорость синерезиса является характеристикой устойчивости пены и ее огнетушащей способности.

Исследования процесса выделения жидкой дисперсионной среды из пены проводились многими авторами, из которых следует упомянуть работы Арбузова К. Н. и Гребенщикова Б. Н. (2), Росса С. и Кутиласа М. (3), Френча Р. и Хинкли П. (4), Митькевича Г. П. (5) и Путихина Б. Д. (6). Своими экспериментами они показывают, что скорость синерезиса можно рассматривать как качественную и количественную величину, характеризующую устойчивость и огнетушащую способность пены. Очень детально эта связь рассмотрена Арбузовым К. Н. и Гребенщиковым Б. Н. (2) на примере пены, полученной из водных растворов сапонаина различной концентрации.

Целью данной работы является исследование скорости синерезиса пены в зависимости от концентрации пенообразователя в водном растворе. Одновременно с этим был разработан и проверен лабораторный метод получения пены, основанный на принципе механического перемешивания для нескольких партий пенообразователя ПО-1, изготовленных по различной рецептуре.

### Экспериментальная часть

Для исследования скорости синерезиса пена готовилась из водных растворов пенообразователя ПО-1, концентрация которых

составляла 1, 2 и 4 % по объему. Пенообразователь ПО-1, на основе которого получали пену, был изготовлен согласно ГОСТ'у 6948—54 Московским Нефтемаслозаводом и по своим основным показателям удовлетворял стандартным требованиям. Наряду с этим были исследованы также пенообразующие свойства 2 % водных растворов опытных партий пенообразователя, изготовленных с повышенным содержанием клея, а также не имеющие в своем составе спирта.

Растворы пенообразователя в количестве 1 л готовились на водопроводной воде за сутки до проведения опытов, тщательно перемешивались и хранились в стеклянном цилиндре с притертой пробкой. К началу наблюдений за пенообразующими свойствами, растворы имели комнатную температуру 17—18° С.

Для исследования скорости синерезиса пена приготавливалась на лабораторном приборе, изображенном на рис. 1, основанном на принципе механического перемешивания. Прибор состоит из кривошипношатунного механизма, движущегося в вертикальном направлении. Основными частями прибора являются: кривошипный механизм, шток, перфорированные диски и стеклянный стакан. Прибор крепится на металлической плите. Механизм приводится в движение от электромотора, число оборотов которого регулируется лабораторным автотрансформатором (ЛАТР-2). Перфорированные диски крепятся на штоке на расстоянии 55 мм один от другого. Для получения пены исследуемый раствор в количестве 100 мл. наливается в стеклянный химический стакан с внутренним диаметром 90 мм и высотой 210 мм. На стенки стакана нанесена градуировка с ценой деления 50 см<sup>3</sup>. В собранном приборе расстояние между нижним диском и дном стакана составляло 10 мм. В проводимых опытах пена получалась при 530 двойных ходах штока в минуту. Ход штока при этом составлял 32 мм.

Следует заметить, что важным условием в исследовании скорости синерезиса пены, получаемой из различных по концентрации пенообразующих растворов, является проведение определений при одинаковой кратности сравниваемых пен. Это связано с тем, что образующаяся при разрушении пузырьков пены жидкая дисперсионная среда должна пройти путь через весь слой пены. Для получения сравнимых результатов необходимо, чтобы этот путь для каждого из опытов был одинаков, а это обуславливается одинаковой кратностью.

В наших опытах кратность пены во всех случаях равнялась 6,8. Это достигалось механическим перемешиванием пенообразующего раствора в течение двух минут при установке регулятора автотрансформатора на деление, соответствующее напряжению 80 в.

Для количественной характеристики синерезиса исследуемая



пена в количестве  $300 \text{ см}^3$  сразу же после ее приготовления помещалась в специальную делительную воронку. Через каждые две минуты выделявшаяся дисперсионная среда — отсек через кран, находящийся в нижней части воронки, сливалась для замера в мерник с делениями, равными  $0,2 \text{ см}^3$ . Первый замер производился через одну минуту после получения пены.

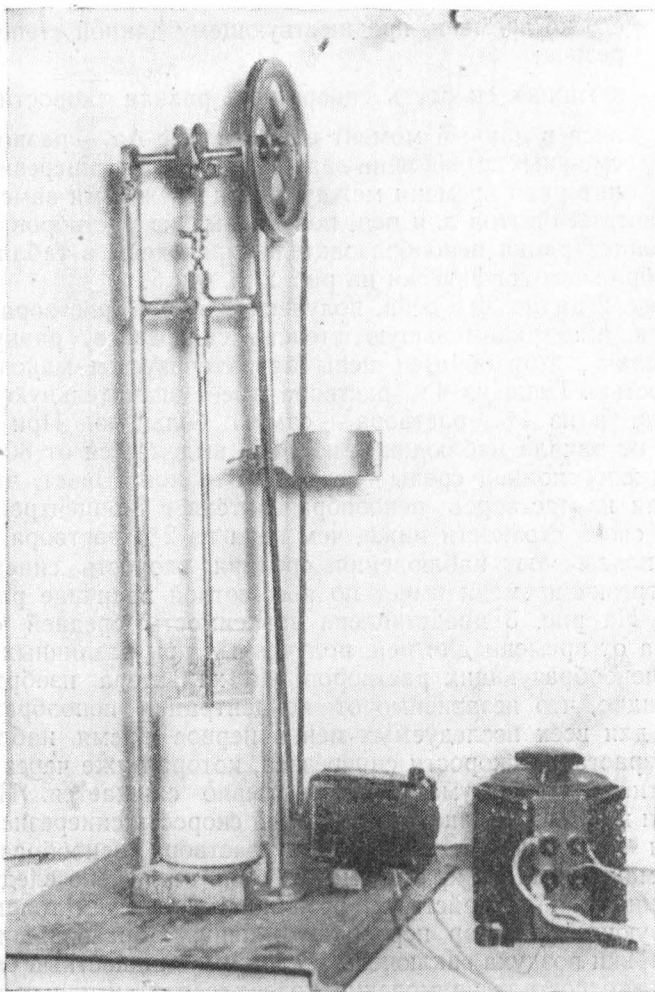


Рис. 1. Лабораторный прибор для получения пены.

Основываясь на работе Арбузова К. Н. и Гребенщикова Б. Н. (2), применительно к пене, полученной на основе пенообразователя ПО-1, нами были использованы для характеристики наблюдаемого явления синерезиса принятые авторами обозначения:

$\alpha$  — степень синерезиса, выраженная в процентах;

$\bar{V} = \frac{\alpha}{\tau}$  — средняя скорость синерезиса, равная отношению степени его ко времени, предшествующему данной степени синерезиса;

$V = \frac{\Delta\alpha}{\Delta\tau}$  — истинная скорость синерезиса, равная скорости синерезиса в данный момент времени, где  $\Delta\alpha$  — разность двух смежных по времени значений степеней синерезиса,  $\Delta\tau$  — интервал времени между двумя смежными замерами.

Результаты опытов для пен, полученных из растворов при различной концентрации пенообразователя, приведены в таблицах 1, 2 и 3 и изображены графически на рис. 2, 3, 4 и 5.

Из рис. 2 видно, что пена, полученная из 2% раствора пенообразователя, имеет наименьшую степень синерезиса, равную 90%. Следовательно, этот образец пены характеризуется максимальной устойчивостью. Пена из 4% раствора имеет значительную степень синерезиса, а из 1% раствора — самую большую. При этом за 15 минут от начала наблюдений из пены выделяется от 80 до 90% жидкой дисперсионной среды — отсека. Это показывает, что пена, полученная из растворов пенообразователя с концентрацией 4% и 1%, по своей стойкости ниже, чем пена из 2% раствора.

Как показывают наблюдения, средняя скорость синерезиса в разные отрезки времени имеет по абсолютной величине различные значения. На рис. 3 представлена зависимость средней скорости синерезиса от времени для пен, полученных при различных концентрациях пенообразующих растворов. Из характера изображенных кривых видно, что независимо от концентрации пенообразующего раствора для всех исследуемых пен в первое время наблюдается резкое возрастание скорости синерезиса, которая уже через три минуты достигает максимума и затем плавно снижается. При этом опять-таки наименьшее значение средней скорости синерезиса характерно для пены, полученной из 2% раствора пенообразователя. Наличие максимума на кривых может быть объяснено следующими соображениями. Под действием резких механических толчков весь пенообразующий раствор переходит в пену. Образовавшиеся при этом пузырьки воздуха заключены в сложные жидкостные оболочки. Эти оболочки состоят из молекул поверхностно активных веществ, молекул воды и молекул стабилизатора, связанных между собой

определенными силами взаимодействия, кроме этого между пузырьками еще удерживается некоторое количество свободной жидкой дисперсионной среды. Пена, как искусственно созданная дисперсная система, из-за имеющегося в ней определенного избыточного запаса свободной энергии, стремится вернуться в свое первоначальное состояние и начинает постепенно разрушаться.

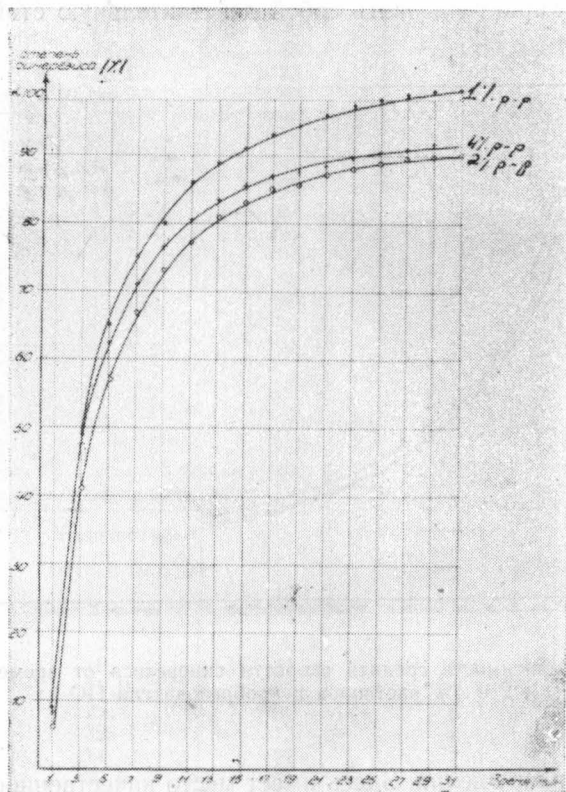


Рис. 2. Зависимость степени синерезиса  $\alpha$  от времени  $\tau$  для 1, 2 и 4% растворов пенообразователя ПО-1.

В первый момент пена претерпевает сложные изменения: из нее сразу же начинается выделяться находящаяся в избытке жидкость, которая не пошла на создание оболочек пузырьков пены и заклю-

цена в пространстве между ними. Одновременно с этим становятся тонкими оболочки пузырьков за счет потери ими части дисперсионной среды, а также изменяется дисперсность самих пузырьков. Для того, чтобы вся эта жидкость скопилась на дне сосуда, ей необходимо пройти сравнительно большой путь через весь объем пены. На это затрачивается время, равное трем минутам, что соответствует максимуму на кривых. Участки кривых, идущие вправо от максимума, будут характеризовать собой действительную стойкость пены

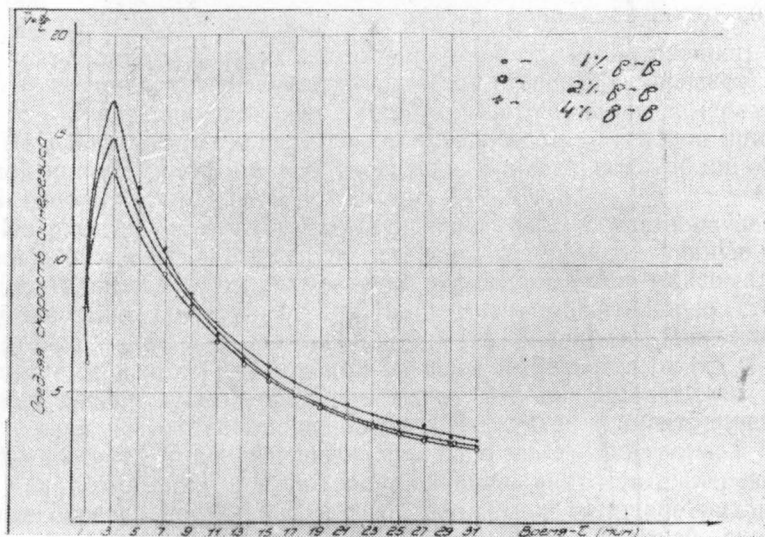


Рис. 3. Зависимость средней скорости синерезиса от времени для 1, 2 и 4% растворов пенообразователя ПО-1.

и процесс ее разрушения. Здесь имеет место качественное изменение всей массы пены, состоящее в том, что пленки пузырьков становятся тонкими, а затем разрушаются. Для пены из раствора пенообразователя ПО-1, обладающей сравнительно высокой стойкостью, этот участок кривых имеет пологий характер. Для пен малоустойчивых эта часть кривой должна быть значительно короче и иметь резкий спад. Таким образом зависимость средней скорости синерезиса от времени характеризует стойкость пены и дает возможность наблюдать кинетику ее разрушения.

Таблица 1

1% раствор ПО-1

Время $\tau$ мин.	Количество отсека (мл)	$\alpha$ %	$V = \frac{\alpha}{\tau}$	$V = \frac{\Delta\alpha}{\Delta\tau}$
1	4	9,1	9,1	9,1
3	21,5	49	16,3	20
5	28,7	65	13	8
7	33,1	75	10,7	5
9	36,2	80	8,9	2,5
11	37,8	86	7,8	3
13	39	88,7	6,3	1,3
15	40	91	6,05	2,9
17	41	93	5,5	1
19	41,5	94,3	5,0	0,6
21	42,2	96	4,6	0,8
23	42,7	97	4,2	0,5
25	43,2	98	3,9	0,5
27	43,5	98,8	3,8	0,4
29	43,7	99,2	3,3	0,2
31	43,8	99,5	3,2	0,1

Таблица 2

2% раствор ПО-1

Время $\tau$ мин.	Количество отсека (мл)	$\alpha$ %	$V = \frac{\alpha}{\tau}$	$V = \frac{\Delta\alpha}{\Delta\tau}$
4	2,7	6,15	6,15	6,15
3	18	41	13,6	17,4
5	25,2	57	11,4	8
7	29,5	67	9,6	5
9	32	73	8,1	3
11	34	77	7,0	2
13	35,5	81	6,23	2
15	36,5	83	5,5	1
17	37,4	85	5	1
19	37,8	86	4,5	0,5
21	38,1	86,7	4,13	0,35
23	38,7	88	3,8	0,6
25	39	88,6	3,54	0,3
27	39,3	89,4	3,3	0,4
29	39,5	89,8	3,1	0,2
31	39,6	90	2,9	0,1



Таблица 3

4% раствор ПО-1

Время $\tau$ мин.	Количество отсека (мл)	$\alpha$ %	$\bar{V} = \frac{\alpha}{\tau}$	$V = \frac{\Delta \alpha}{\Delta \tau}$
1	3,7	8,4	8,4	8,4
3	21	47,7	15,9	19,6
5	27,5	62,5	12,5	7,4
7	31,2	71,0	10,1	4,2
9	33,7	76,5	8,5	2,8
11	35,5	80,5	7,3	2
13	36,9	83,7	6,4	1,6
15	37,6	85,5	5,7	0,9
17	38	86,5	5,1	0,5
19	38,4	87,2	4,6	0,4
21	38,9	88,3	4,2	0,5
23	39,4	89,5	3,9	0,6
25	39,7	90,3	3,6	0,4
27	40	90,8	3,3	0,2
29	40,3	91,5	3,15	0,3
31	40,4	91,7	2,95	0,1

На рис. 4 и 5 показана зависимость средней и истинной скоростей синерезиса от степени синерезиса. Из характера этих кривых видно существенное различие в скоростях синерезиса пен, полученных из растворов различной концентрации пенообразователя. Так, для пены, полученной из 2% раствора, максимум на кривой приходится на 40% степени синерезиса, а для пены из 1 и 4% раствора примерно на 50%. Разрушение пены, полученной из 2% раствора, идет значительно медленнее, чем для двух других образцов, и, следовательно, она более устойчива.

Проведенные исследования показывают, что, получая пену на приборе и измеряя скорость выделения дисперсионной среды, мы можем характеризовать кратность и стойкость пены, так как методика, принятая ГОСТом 6948—54 не дает возможности отчетливо выявить качество изготовленного пенообразователя для использования его в огнетушащих целях.

Для проведения опытов был тщательно проверен режим работы сконструированного нами лабораторного прибора для получения пены, в зависимости от числа оборотов коленчатого вала и различных расстояний между перфорированными дисками на штоке.

Опыты показали, что для получения пены кратностью не ниже 10 движение штока должно быть в пределах 520—540 двойных ходов в минуту. При этом следует применять три перфорированных диска,

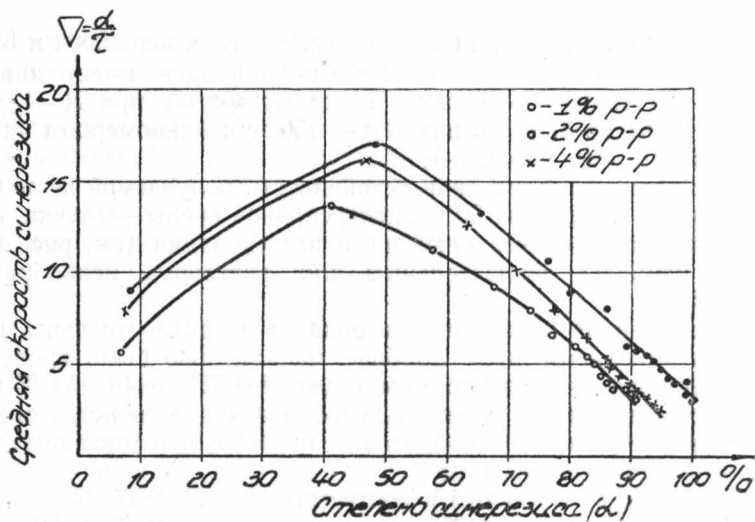


Рис. 4. Зависимость средней скорости синерезиса  $\bar{V}$  от степени синерезиса  $\alpha$  для 1, 2 и 4% растворов пенообразователя ПО-1.

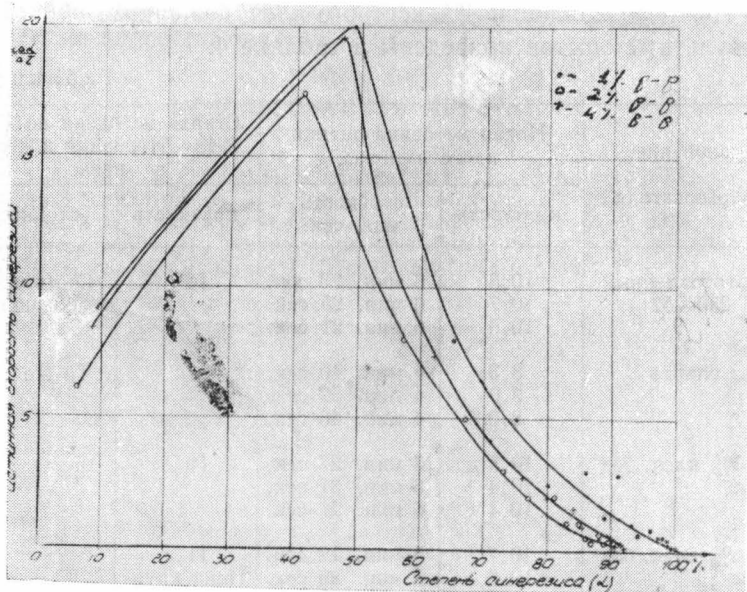


Рис. 5. Зависимость истинной скорости синерезиса от степени синерезиса для 1, 2, 4% растворов пенообразователя ПО-1.

закрепленных на расстоянии 50 мм между двумя верхними и 55 мм между нижним и средним дисками (нижний диск имеет диаметр 70 мм, а оба верхние — 65 мм. Число отверстий при  $D=1$  мм в верхних дисках по 370, а в нижнем — 400 при равномерном их распределении по всей площади).

В качестве характеристики устойчивости получаемой пены было принято время выделения 50% дисперсионной среды — отсека, которое, как показали проведенные нами исследования (см. рис. 4, 5), является наиболее показательным для растворов пенообразователя ПО-1.

Для сравнения показателей стойкости и кратности пены, полученной на описанном выше приборе, параллельно были проверены определения этих же свойств по методике ГОСТ'a 6948—54. В контрольных опытах были проверены пенообразующие свойства следующих четырех образцов пенообразователя ПО-1, изготовленных Московским Нефтемаслозаводом:

- а) ПО-1, изготовленный в соответствии с ТУ 250—52;
- б) ПО-1, изготовленный в соответствии с ТУ 250—52, но не содержащий в своем составе спирта;
- в) ПО-1, содержащий 3% костного клея, без спирта;
- г) ПО-1, содержащий 4% костного клея, без спирта.

Результаты опытов приведены в таблице 4.

Таблица 4

Наименование пенообразователя	Новая методика оценки качества пены		Старая методика по ГОСТ 6948—54 оценки качества пены	
	краткость	стойкость мин. сек.	краткость	стойкость
ПО-1, изготовленный по ТУ 250—52	10,5 10,7 10,6	6 мин. 23 сек. 6 мин. 25 сек. 6 мин. 21 сек.	10	Соответствует требованиям
ПО-1 без спирта	8,3 8,0 8,0	4 мин. 40 сек. 4 мин. 52 сек. 4 мин. 46 сек.	7	То же
ПО-1 с 3% клея, без спирта	10,5 10,4 10,4	6 мин. 27 сек. 6 мин. 31 сек. 6 мин. 21 сек.	10	»
ПО-1 с 4% клея, без спирта	10,7 10,6 10,5	5 мин. 19 сек. 5 мин. 22 сек. 5 мин. 27 сек.	11,5 Пена круп- ноячеистая	»

Из данных в таблице 4 видно, что рассмотренная методика оценки качества пены, получаемой в механической мешалке, в части кратности хорошо сочетается со старой. Кроме того, новая методика позволяет более точно в количественном отношении характеризовать стойкость пены. Цифровые данные показывают также достаточно хорошую воспроизводимость результатов для каждого из образцов пенообразователя. При этом пена хорошего качества характеризуется кратностью не ниже 10 и временем выделения 50% дисперсионной среды—отсека — не менее 6 минут.

### Выводы

1. Исследовано явление синерезиса пены, полученной из водных растворов пенообразователя ПО-1, для различных концентраций пенообразующих растворов (1, 2 и 4 %).

2. Показано, что качество пены, если получают ее в стабильных условиях, характеризуется скоростью синерезиса.

3. Разработана лабораторная методика определения стойкости и кратности пен, позволяющая в практических условиях достаточно надежно характеризовать качество воздушно-механических пен.

Данная методика включается в пересматриваемый ГОСТ 6948—54 на пенообразователь ПО-1.

### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ребиндер П. А., Колл. ж. 3, 8, 157, 1956.
2. Арбузов К. Н., Гребеншиков Б. Н. Ж. Ф. Х., 10, вып. 1, 1937.
3. Ross S., Cutillas M. J. J. Physical Chemistry 9, 59, 1955.
4. French R. J., Hinkley P. Z. J. of Applied Chemistry 4, 9, 1954.
5. Митькевич Г. П., Журн. прикл. хим. 7, 21, 1948.
6. Путенихин Б. Д. Отчет ЦНИИПО МВД СССР, 1952 г.

Инж. В. С. ФЕДОРЕНКО

## ОБ ОГНЕСТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ ЦЕНТРАЛЬНО СЖАТЫХ КОЛОНН

### 1. Введение

За последнее время в практике строительства нашей страны особенно широкое применение получили сборные железобетонные конструкции и детали, наряду с которыми все еще значительное место занимают стальные конструкции.

При современных индустриальных методах производства работ эти конструкции позволяют осуществлять ускоренный их монтаж, обеспечивая экономию труда и времени при возведении ответственных зданий и сооружений.

Вместе с этим общие требования снижения себестоимости строительных работ ставят задачу всемерной экономии строительных материалов, в том числе металла. Они нашли отражение в Технических правилах по экономному расходованию металла, цемента и леса (ТП-101—57). Согласно ТП-101—57 применение в строительстве металла, так же как и других указанных материалов, ограничивается.

Так, например, в многоэтажных промышленных зданиях применение металлического каркаса допускается при наличии специального обоснования, элементы конструкций из металла рекомендуется принимать, как правило, облегченного типа и т. д.

Эти ограничения нельзя однако рассматривать, как требования повсеместной замены стальных или деревянных конструкций железобетоном, т. е. в данном случае не ставится вопрос о вытеснении металла другими материалами и снижении роли металлических конструкций в строительстве. Поэтому, согласно ТП-101—57, разрешается применение металлических колонн и фахверка для цехов промышленных зданий, имеющих соответствующие пролеты и высоту, для сборно-разборных и переносных зданий и сооружений II степени огнестойкости, в ряде случаев при строительстве коммуникационных (наклонных) эстакад на нефтеперерабатывающих

предприятиях, заводах искусственного жидкого топлива, при реконструкции или восстановлении зданий и т. д.

Устанавливая определенные требования по экономному расходованию металла (а в равной степени цемента и леса), Технические правила вместе с этим дают четкие указания относительно рационального его применения в строительстве, являясь таким образом серьезным стимулом для изыскания новых конструктивных форм и решений стальных конструкций.

Согласно требованиям «Норм и технических условий проектирования стальных конструкций (Н и ТУ 121—55), стальные конструкции, находящиеся под воздействием температуры до 150° и выше, подлежат защите от нагревания (от расплавленного металла и т. д.).

При этом в Н и ТУ 121—55 даны лишь общие указания о необходимости защиты таких конструкций облицовкой из огнеупорного кирпича или жароупорного бетона без рекомендаций оптимальных толщин облицовок, возможности применения для этих целей других, менее дефицитных материалов и т. д.

Очевидно такие общие рекомендации являются результатом отсутствия в отечественной литературе достаточных данных, характеризующих материалы облицовок с точки зрения их прогреваемости при воздействии высоких температур, а также данных о поведении стальных конструкций в условиях пожара или при воздействии на них повышенной температуры.

Стальные открытые конструкции в соответствии с Противопожарными нормами строительного проектирования (Н 102—54) относятся к группе нескоряемых. Вместе с тем, под воздействием высокой температуры на пожарах незащищенные стальные элементы зданий (колонны, стойки, балки, фермы и др.) или имеющие недостаточную степень защиты от огня, подвергаясь нагреву, деформируются и сравнительно быстро утрачивают несущую способность.

В практической деятельности пожарной охраны имеется немало примеров, свидетельствующих о том, что эти конструкции, даже при сравнительно кратковременных пожарах, сильно деформировались и вызывали серьезные, часто непоправимые разрушения горящих объектов.

Учитывая изложенное, пределы огнестойкости для таких элементов как стальные незащищенные колонны и др. конструкции приняты от 0,25 до 0,50 часа.

Согласно Н 102—54 несущие конструкции зданий и сооружений I, II и частично III степеней огнестойкости рекомендуется, как правило, выполнять из нескоряемых материалов. Причем предел огне-



стойкости таких конструкций, как колонны, во всех этих случаях должен быть не менее 3 часов. \*)).

При размещении же в зданиях I степени огнестойкости значительного количества сгораемых материалов (в среднем более 100 кг/м<sup>2</sup> площади пола) пределы огнестойкости колонн и столбов должны увеличиваться до 4—5 часов.

Таким образом, в этих случаях стальные конструкции, ввиду их слабого сопротивления воздействию пожара, требуют серьезных мероприятий, направленных на всемерное улучшение их огнестойкости.

Предел огнестойкости стальных конструкций является одной из тех основных характеристик, которая должна быть известна при проектировании и возведении зданий и сооружений с применением металла. До последнего времени в ряде зарубежных стран (в Англии, Франции, США, Бельгии, Голландии и др.) пределы огнестойкости строительных конструкций обычно устанавливаются опытным путем.

С этой целью в указанных странах созданы и функционируют специальные испытательные станции и разработаны стандарты, определяющие методы огневых испытаний строительных конструкций.

Работы в этом направлении в нашей стране фактически впервые начались с 1946 года. В ЦНИИПО были проведены испытания на огнестойкость стальных колонн по так называемой упрощенной методике. Согласно этой методике были испытаны опытные образцы колонн, представляющие собой стальные стержни двутаврового профиля (№№ 20—22) длиной около 3,0 м, облицованные различными материалами (кирпичом, бетонами различных составов и т. д.).

Образцы в ненагруженном состоянии подвергались с боковых сторон нагреву в печи, температурный режим которой изменялся во времени по кривой, близкой к условиям реального пожара. \*\*)

Основным признаком наступления предела огнестойкости считалось время от начала испытания до момента, при котором температура стального стержня колонны под облицовкой достигала 500—530° С. Это значение температуры было принято условно считать критическим. При указанной температуре предел текучести, обычно применяемой в строительных конструкциях стали марки Ст. 3, снижается примерно в два раза. Такое снижение предела

---

\*) Известное исключение составляют производственные здания II степени огнестойкости при отсутствии в них в качестве топлива горючих жидкостей.

\*\*) Этот температурный режим испытания конструкций на огнестойкость нашел затем отражение в Противопожарных нормах (Н 102—51 и позже в Н 102—54)..

текучности ( $\sigma_T$ ) в случае, если бы стальные колонны испытывались при напряжениях порядка  $\frac{\sigma_T}{\sigma} = 2$  должно было приводить к потере их несущей способности и, следовательно, — наступлению предела огнестойкости.

Однако для других соотношений  $\frac{\sigma_T}{\sigma}$ , т. е. для колонн, имеющих другие коэффициенты запаса \*) (больше или меньше двух), значения критической температуры должны быть больше или меньше 500—530° и в зависимости от этого — больше или меньше их пределы огнестойкости.

Таким образом, принятый метод испытания учитывал лишь один частный случай напряженного состояния стальных стержней колонн. Температура 500—530° С считалась критической не только для стальных стержней, облицованных кирпичом, керамическими блоками, или защищенных штукатуркой по сетке (т. е. материалами, на которые эксплуатационная нагрузка в стальных колоннах обычно не рассчитывается), но и для стержней обетонированных, фактически представляющих собой железобетонные колонны с жесткой арматурой.

Для таких колонн, и в том числе с гибкой арматурой, принятый метод упрощенных испытаний был совершенно неприемлем. Указанные испытания также не учитывали характера и признаков потери несущей способности стальных стержней колонн под нагрузкой в зависимости от значений их гибкости ( $\lambda = \frac{l_0}{r}$ ). Поскольку колонны имели сравнительно легкие профили стальных стержней (площадью поперечного сечения порядка 70 см<sup>2</sup>), то не было изучено и влияние на скорость прогрева их площади сечения металла (массы металла).

Следовательно, испытания по упрощенной методике позволили получить лишь сравнительные данные о поведении при высоких температурах и прогреваемости некоторых материалов, используемых для облицовки стальных стержней колонн. Эти же испытания показали, что сопротивляемость стальных колонн огню при пожаре, как впрочем и других строительных конструкций, зависит от целого ряда конструктивных параметров, взаимосвязь и значение каждого из которых было крайне необходимо установить дальнейшим расширением работ.

Приведенные соображения и практическая актуальность проблемы огнестойкости строительных конструкций определили необ-

---

\*) Термин «коэффициент запаса» употребляется в соответствии с методикой расчета конструкций по допускаемым напряжениям.

ходимость разработки более совершенной методики испытаний и создание специальной установки для исследования огнестойкости колонн под нагрузкой.

Последующие разделы настоящей работы посвящены методике работ и результатам, полученным при исследовании огнестойкости стальных колонн под нагрузкой.

## II. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка, созданная ЦНИИПО в 1949—1950 гг. для проведения работ, связанных с исследованием огнестойкости колонн под нагрузкой, состоит из следующих основных элементов:

- а) печи, в рабочей камере которой при испытании поддерживается заданный температурный режим;
- б) стальной рамы с гидравлическим прессом, сообщающим нагрузку опытными конструкциям;
- в) подъемно-транспортных устройств для подачи опытных конструкций к месту испытания и их удаления после испытания.

Печь запроектирована в виде 2 разъемных частей (рис. 1 и 2). В сомкнутом состоянии они образуют 1 вертикальную камеру, ограниченную по бокам четырьмя стенками из огнеупорного кирпича, а сверху и снизу — соответственно сводом и подом печи. Рабочая камера печи в плане имеет размеры  $1\,200 \times 1\,200$  мм. Высота рабочей камеры печи составляет примерно 2 600 мм. Общая высота, включая свод и под печи, — 3 040 мм. В своде печи, выполненном в виде съемных блоков из огнеупорного бетона, и в ее поде предусмотрены расположенные одно против другого два окна размером  $600 \times 600$  мм для пропуска через них свободных концов колонн 2, выступающих из рабочей камеры печи.

Каждая из двух частей печи заключена в жесткий стальной каркас из уголка и расположена на стальных массивных тележках (3), строго установленных одна против другой на рельсах. При перемещении по рельсам обе половины печи могут соединяться вместе, образуя замкнутую камеру объемом  $3,60\text{ м}^3$ .

В стенках печи имеются смотровые окна 4, позволяющие производить периодическое наблюдение за состоянием опытной конструкции в процессе испытания. В этих же стенках имеются отверстия для термопар 5, с помощью которых осуществляется контроль за изменением температуры газов в камере печи.

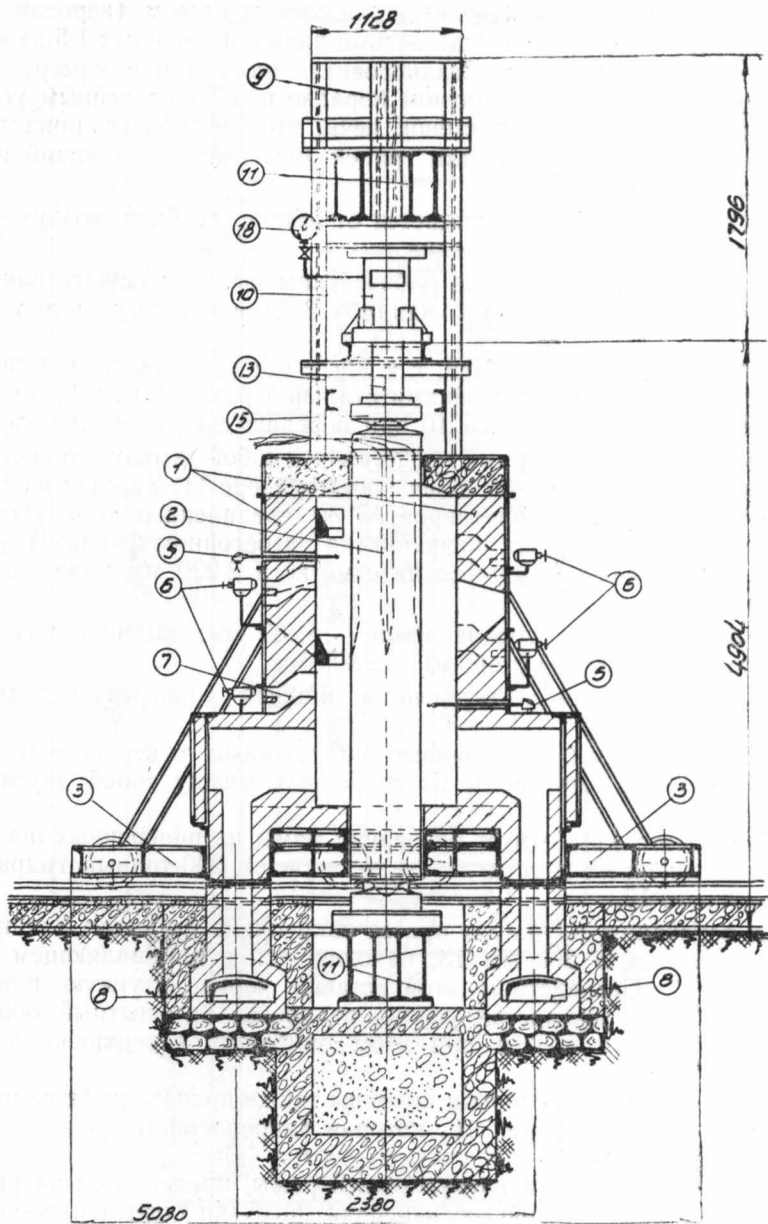


Рис. 1. Продольный разрез печи и нагружающего устройства.

Отопление печи производится жидким топливом (керосин или моторное топливо) при помощи восьми длиннопламенных 1,5-дюймовых форсунок 6 системы Стальпроекта. Форсунки и камеры для них 7 расположены в шахматном порядке под определенным углом к внутренней поверхности стенок печи, что исключает попадание пламени на отдельные участки граней опытных конструкций и их местный перегрев.

Топливо к форсункам подается от напорного бака, воздух — от воздуходувки высокого давления.

Отвод дымовых газов из рабочей камеры печи осуществляется посредством двух дымовых каналов 8, соединенных с дымовой трубой.

Печь в рабочем состоянии, т. е. когда обе ее половины сомкнуты, находится между двумя стойками стальной рамы 9, рис. 2, воспринимающей усилия от пресса 10 при передаче нагрузки на колонну.

Конструктивно эта рама представляет собой замкнутую систему, состоящую из стоек и двух поперечных траверс 11. Каждая из стоек рамы выполнена из 4 двутавров № 30, соединенных между собой стальной решеткой. Рама расположена на бетонном фундаменте 12, основание которого находится на отметке в 2 220 мм ниже уровня земли.

Высота рамы от уровня земли — 6 380 мм; ширина рамы по осям стоек с фасадной стороны — 2 800 мм.

Расстояние между верхней и нижней траверсами рамы — 5 750 мм.

Траверсы рамы, соединенные со стойками у верхнего и нижнего оснований, выполнены из спаренных между собой двутавров № 55а.

На высоте 4 900 мм от основания рамы на поперечных швеллерах, закрепленных к ее стойкам, установлен 200-тонный гидравлический пресс 10.

К основанию плунжера пресса закреплена чугунная цилиндрическая вставка Ø 200 мм 13, находящаяся в направляющем подшипнике 14. Посредством этой вставки через чугунную плиту с полусферой 15 передается усилие от пресса на опытный образец колонны. Корпус пресса при этом опирается в верхнюю траверсу рамы.

Опираание нижнего конца колонны также производится на чугунную плиту с полусферой 16, которая закреплена в средней части нижней траверсы.

Общий вид печи и нагружающей рамы, представлен на рис. 3. Описанное выше устройство передачи нагрузки опытным образцам

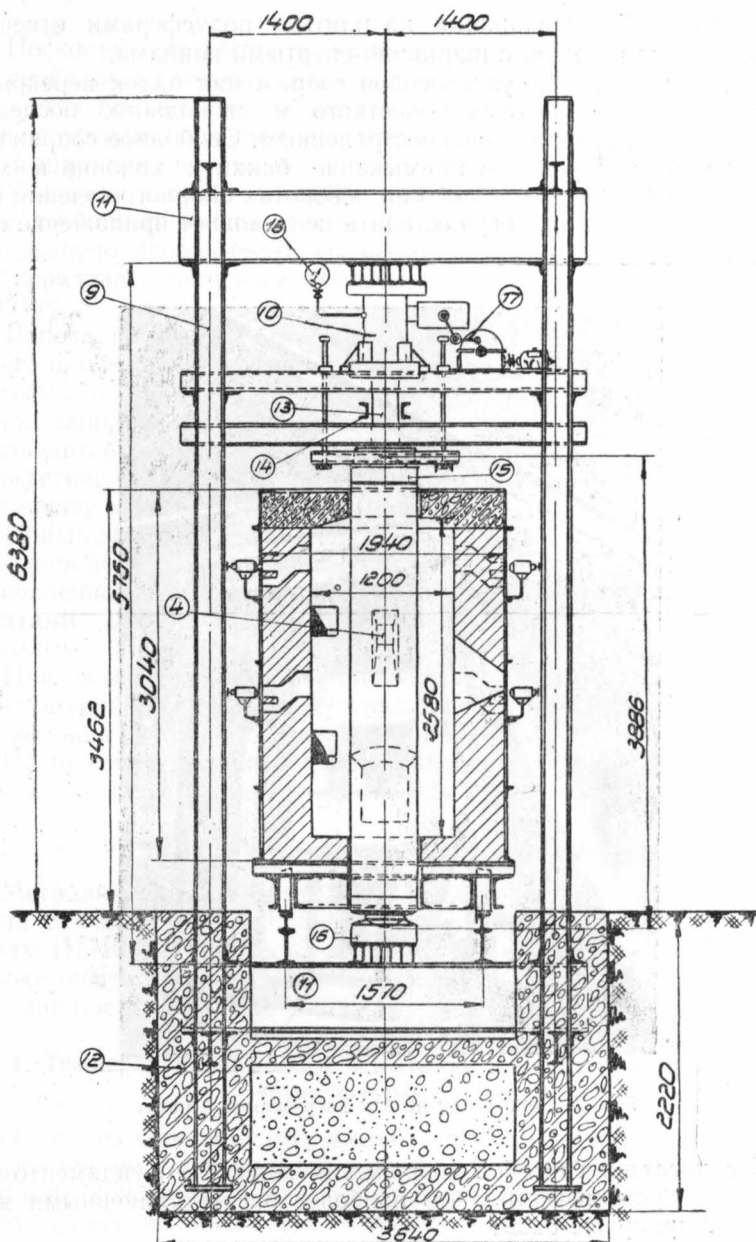


Рис. 2. Поперечный разрез печи.



колонн и способ их опирания на плиты с полусферами отвечают случаю работы стержня с шарнирно-опертыми концами.

Как известно, из двух способов сопряжения балок перекрытий с одноярусными колоннами — жесткого и свободного, последний способ является наиболее распространенным. Свободное сопряжение не только дает шарнирное примыкание балки к колонне и мало отражается на работе колонны при поворотах опорного сечения балки, но и позволяет легко осуществлять центральное приложение сжимающей нагрузки.

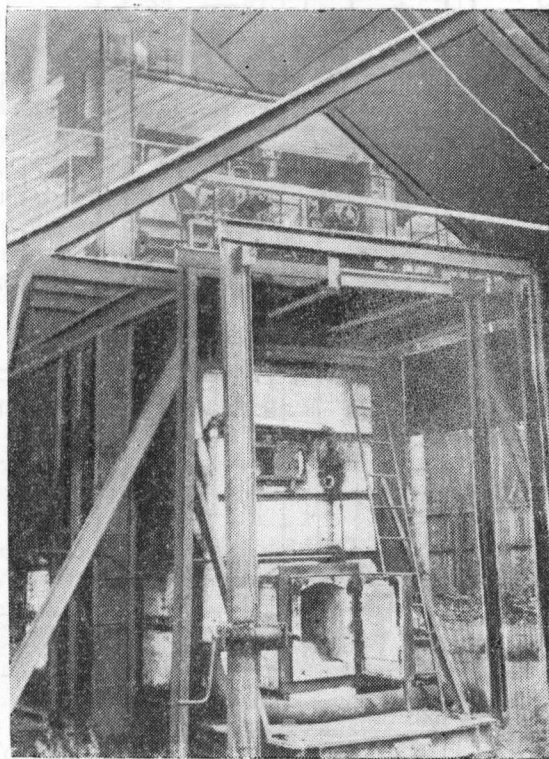


Рис. 3. Общий вид печи и нагружающей рамы.

Что касается способов сопряжения колонн с фундаментом, то в данном случае известно, что наиболее распространенными являются бесшарнирные базы.

Поскольку осуществить жесткую заделку или идеальный шарнир свободных концов колонн практически бывает невозможно, то часто, для большей надежности в расчетах, принимают концы колонн не абсолютно защемленными или имеющими идеальный шарнир, а шарнирно-опертыми.

Учитывая в целом большую сложность выбора способа закрепления свободных концов колонн при их испытании на огнестойкость, было решено использовать указанные выше полусферы, позволяющие передавать колоннам центрально приложенную сжимающую нагрузку.

Работа пресса достигается с помощью редуктора '17, приводящего в действие масляный насос пресса. При повышении нагрузки в результате удлинения стального стержня от температуры, с помощью запорной иглы, соединенной с масляным насосом пресса, производится плавный сброс масла из цилиндра пресса. При этом соответствие фактической нагрузки, передаваемой колонне, заданной ее величине контролируется манометром 18.

При подготовке к испытанию на огнестойкость, опытные образцы колонн подаются с помощью крана-балки к специальной тележке, установленной на подвесном пути. Указанная тележка снабжена захватами, удерживающими колонну на некотором расстоянии от земли.

При своем движении в сторону стальной рамы пресса тележка подает колонну к опорным чугунным плитам с полусферами, после чего колонна устанавливается на нижнюю опорную плиту.

Нагружение колонны производится после ее центрировки на опорных плитах стальной рамы пресса.

### **III. Методика испытаний колонн**

Методика испытания стальных колонн на огнестойкость разработана с учетом рекомендаций, изложенных в Противопожарных нормах (Н 102—54), строительных нормах и правилах (СН и П), а также опыта работы ЦНИИПО, полученного в этом направлении в течение последних лет.

#### **1. Температурный режим испытаний и порядок измерения температуры в печи**

Одним из основных положений методики является температурный режим, поддерживаемый в рабочей камере печи в процессе испытания конструкций на огнестойкость. Этот режим подчиняется закону кривой «Температура — время» (рис. 4), основные координаты точек которой приняты следующими:

через 10 мин. после начала опыта . . . . .	700°
через 30 мин. » » » . . . . .	800°
через 1 час » » » . . . . .	900°
через 2 часа » » » . . . . .	1000°
через 8 часов » » » . . . . .	1250°

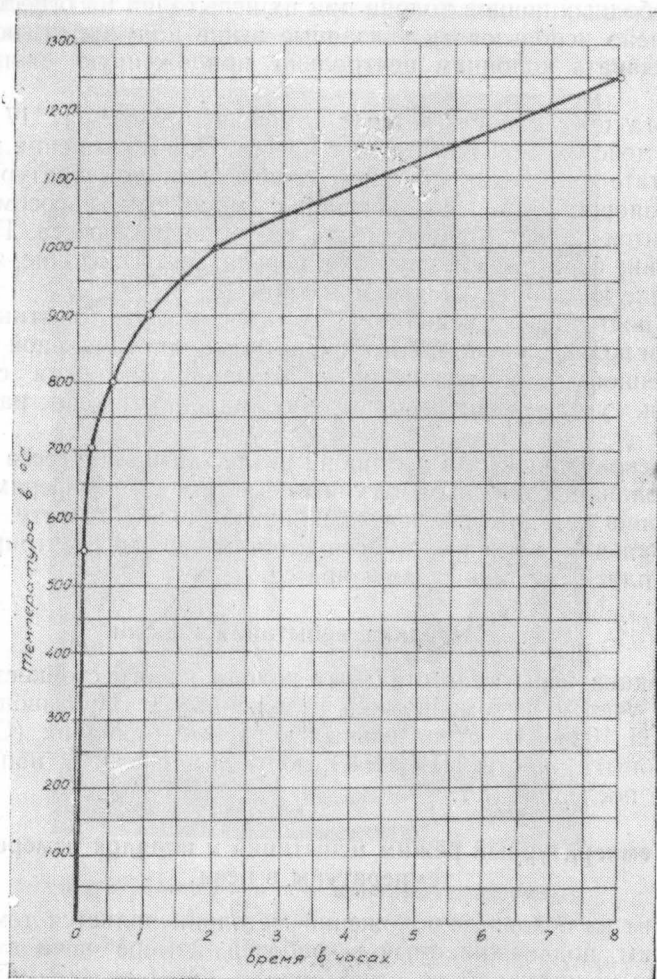


Рис. 4. Кривая «Температура — время».

В процессе испытаний допускаются следующие отклонения температуры:

- а) в течение первых 30 мин. испытания  $\pm 10\%$ ;
- б) в последующее время испытания  $\pm 5\%$ .

Измерение температуры в печи осуществлялось с помощью термопар, «горячие» спаи которых располагались в трех точках у обогреваемых граней колонн на расстоянии от них около 15 см.

Показания термопар регистрировались с помощью гальванометров каждые  $5 \div 7$  мин. в течение первого часа испытания и  $10 \div 15$  мин. — в последующее время до конца испытания.

Величина температуры в печи в данный момент времени оценивалась как среднее арифметическое из показаний всех термопар, расположенных в рабочей камере печи.

## 2. Измерение температуры опытных конструкций

В процессе испытаний каждой колонны, обогреваемой со всей боковой поверхности, осуществлялось измерение температуры в соответствующих точках стальных стержней и облицовки. Это достигалось с помощью тонких ( $\varnothing 0,5 \div 0,6$  мм) хромель-копелевых и хромель-алюмелевых термопар, устанавливаемых в средней части по длине стержней колонн, а при необходимости и в других участках, расположенных выше и ниже от средней части стержней.

В отличие от прежнего способа установки термопар\*) в опытах 1953—1955 гг. «горячие» спаи их укладывались в специальные канавки, проделанные на поверхности стальных стержней колонн, и затем с помощью кернения или завальцовки укреплялись в канавках на глубине  $0,5 \div 0,8$  диаметра проволоки термопары.

При этом рабочий участок термопары («горячий» спай) принимался не менее 30 диаметров проволоки. Установка термопар в облицовке колонн осуществлялась путем их заделки с помощью жидкого стекла и цемьянки, гипса и т. д. (в зависимости от вида материала облицовки). Свободные концы термопар выводились наружу в пространстве между облицовкой и стержнями колонн.

Показания термопар регистрировались гальванометрами через отрезки времени, принятые при измерении температуры в печи. Однако с целью более точного определения температуры стержней колонн к концу испытания, промежутки времени между отсчетами показаний этих термопар сокращались до  $2,5 \div 5$  мин.

---

\*) В опытах 1946—1948 гг. термопары прижимались к поверхности стальных стержней винтами через небольшие скобки и металлические пластинки с асбестом.

### 3. Центрировка колонн и измерение деформаций

Перед испытанием на огнестойкость колонны центрировались, что достигалось совмещением делений (сетки) на опорных чугунных плитах и делений (рисок) на опорных элементах стержней колонн, совпадающих с геометрической осью последних.

В отдельных случаях для центрировки применялись тензометры, показания которых использовались также для сравнения фактических начальных деформаций стальных стержней от действующей нагрузки с расчетными. В процессе испытаний деформаций удлинения и укорочения стальных стержней от температуры и нагрузки измерялись с помощью прогибомеров системы Максимова.

Нити прогибомеров закреплялись в четырех точках к верхней опорной плите, передающей нагрузку от пресса стальному стержню колонны.

Отсчеты показаний прогибомеров производились одновременно с отсчетами температуры стержня.

### 4. Размеры колонн и подбор нагрузок

Опытные образцы колонн имели длину — 3 500 мм, поперечное сечение, включая облицовку — до  $500 \times 500$  мм. Площадь и форма поперечного сечения стальных стержней колонн определялись в зависимости от вопросов, которые надлежало исследовать или уточнить испытанием на огнестойкость той или иной серии опытных конструкций.

Центрально приложенная нагрузка, передаваемая стальным стержням колонн при испытании последних на огнестойкость, сохранялась постоянной.

Подбор нагрузки осуществлялся расчетом по допускаемым напряжениям согласно следующей формуле:

$$F = \frac{N}{\varphi[\sigma]},$$

где:  $N$  — нагрузка в кг,

$F$  — площадь поперечного сечения стального стержня — в  $\text{см}^2$ ,

$\varphi$  — коэффициент продольного изгиба  $\varphi = f\left(\frac{\lambda}{r}\right)$ .

$\sigma$  — допускаемое напряжение — в  $\text{кг}/\text{см}^2$ .

При расчете учитывались принятая схема опирания свободных концов стержней, их гибкость  $\left(\lambda = \frac{l_0}{r}\right)$ , а также форма и площадь поперечного сечения.

Напряженное состояние стержней характеризовалось отношением  $\frac{\sigma_r}{\sigma}$ , величина которого устанавливалась для каждой колонны из фактических значений предела текучести и действительного напряжения ( $\sigma$ ).

Выбранные сечения стержней удовлетворяли условию прочности:

$$\sigma = \frac{N}{F} \leq [\sigma].$$

Для гибких стержней с  $\lambda \geq 100$  допускаемые напряжения на устойчивость определялись по формуле

$$\sigma_y = \varphi [\sigma], \text{ или: } \sigma_y = \frac{\sigma_{кр}}{K_y} = \frac{\pi^2 E}{K_y \lambda^2},$$

где:  $E$  — модуль упругости стали — в кг/см<sup>2</sup>;

$K_y$  — коэффициент запаса на устойчивость;

$\lambda$  — гибкость стержня.

## 5. Предел огнестойкости колонн

Предел огнестойкости определялся временем (в часах — минутах) от начала испытания до момента, при котором стальной стержень колонны под воздействием температуры утрачивал несущую способность (прочность).

Этот момент времени совпадал с изменением знака деформации стального стержня колонны, когда после периода, характеризующегося удлинением стержня от температуры, отмечалось его укорочение при одновременном падении нагрузки в прессе.

## 6. Число испытаний и допускаемые отклонения пределов огнестойкости

Величина предела огнестойкости данного типа колонн определялась как среднее арифметическое значение из результатов испытания двух образцов — «близнецов». Наибольшее отклонение полученного предела огнестойкости от среднего арифметического значения принималось 10%.

## 7. Лабораторные испытания

Перед испытанием колонн на огнестойкость определялись следующие характеристики их материалов:

а) предел прочности и предел текучести элементов стальных стержней;



б) предел прочности, объемный вес и влажность материалов, используемых для облицовки стальных стержней колонн.

Для строительных растворов и штукатурок предел прочности, объемный вес и влажность, как правило, определялись в день испытаний опытной конструкции (после срока ее выдержки, равного  $28 \div 30$  дням).

#### IV. Перечень вопросов, связанных с исследованием огнестойкости стальных колонн

Как отмечено в разделе I настоящей статьи, в Н 102—54 значения пределов огнестойкости стальных колонн, исключая незащищенные стержни \*), даны только от одного их конструктивного параметра — толщины облицовки. Нормами не учитывается такой важный фактор, как различие теплотехнических свойств материалов, применяющихся для облицовки стальных стержней колонн.

Так, согласно Н 102—54, прогреваемость облицовки, выполненной, например, в  $\frac{1}{4}$  кирпича (65 мм), или облицовки такой же толщины, но выполненной из гипсовых плит, керамических камней и других материалов является одинаковой. Как следствие, вытекающее из этого допущения норм, пределы огнестойкости колонн, облицованных различными материалами, при равной их толщине приняты одинаковыми.

Правомерность такого обобщения норм представлялось необходимым уточнить путем постановки специальных исследований огнестойкости конструкций с различными видами облицовки.

В указанных нормах, а также в других источниках отсутствуют данные о влиянии на огнестойкость колонн толщины и месторасположения несгораемого заполнения.

Не имеется данных, учитывающих связь между критической температурой прогрева стальных стержней, коэффициентом запаса конструкций и пределом огнестойкости, хотя вполне очевидно, что с изменением отношения  $\frac{\sigma_t}{\sigma}$ , характеризующего напряженное состояние конструкции, должна изменяться величина критической температуры ( $t_k$ ) стержня, а следовательно, и величина предела огнестойкости колонны.

Не было утановлено влияния на огнестойкость колонн площади поперечного сечения (массы) металла, конструктивных решений, используемых в практике строительства при облицовке стальных

---

\*) В Н 102—54 для незащищенных колонн даны значения пределов огнестойкости в зависимости от площади поперечного сечения металла.

стержней. Не был выяснен характер потери несущей способности в условиях пожара гибких центрально сжатых стержней (колонн, опор и стоек) и прежде всего — не определена величина критической температуры прогрева стали этих элементов и т. д.

Таким образом, для правильной оценки огнестойкости стальных колонн и установления зависимости пределов огнестойкости их от различных конструктивных параметров надлежало провести значительную по своему объему и характеру исследовательскую работу.

В связи с этими исследованиями огнестойкости стальных колонн в период с 1953 по 1955 год надлежало:

- 1) выявить зависимость пределов огнестойкости колонн от вида и толщины материалов, используемых для облицовки стальных стержней;

- 2) дать оценку надежности в условиях пожара некоторых из основных конструктивных решений облицовки стальных стержней колонн и выявить поведение материалов облицовки при высоких температурах;

- 3) определить фактическую эффективность заполнения внутреннего пространства колонн с точки зрения его влияния на огнестойкость;

- 4) установить влияние площади и формы поперечного сечения стальных стержней на огнестойкость колонн;

- 5) выявить связь между коэффициентом запаса конструкций, критической температурой стальных стержней и пределом огнестойкости колонн;

- 6) разработать простые методы расчета пределов огнестойкости колонн и т. п.

#### **V. Краткое описание конструкций колонн, испытанных на огнестойкость**

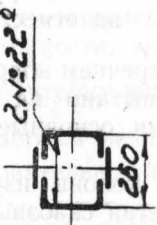
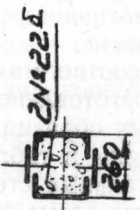
В соответствии с перечнем вопросов, подлежащих исследованию, было изготовлено и испытано на огнестойкость под нагрузкой 42 опытных образца колонн, основные конструктивные данные которых приведены в таблице 1.

Стальные стержни колонн изготавливались в виде сплошных и сквозных элементов. Ветви сквозных колонн соединялись безраскосной решеткой с помощью планок. Стержни сплошных колонн состояли из отдельных элементов стального проката (уголок, двутавр, швеллер), соединенных между собой с помощью электросварки.

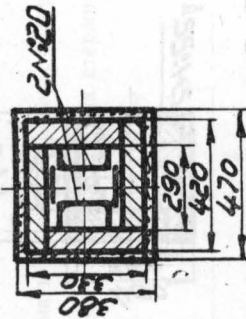
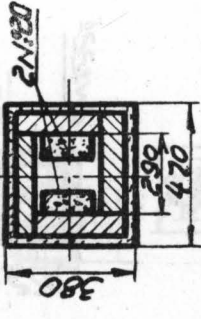
Расстояние между ветвями принималось исходя из условия равноустойчивости сквозной колонны относительно оси  $X-X$  и  $Y-Y$ .

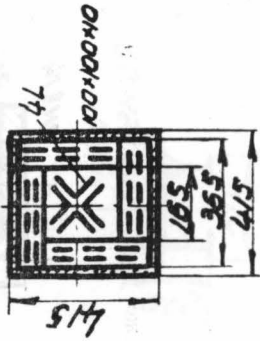
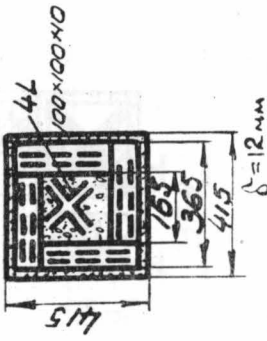
Таблица 1

## Конструктивные данные опытных образцов колонн

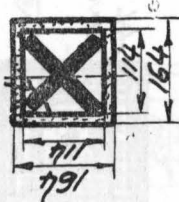
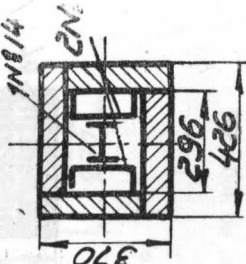
№ № п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Схема и основные размеры поперечного сечения стальных стержней колонн в мм	Количество штук	Площадь поперечн. сечения стальных стержней $\text{см}^2$	Предел текучести $\text{кг}/\text{см}^2$	Гибкость $\frac{1}{r}$	Рабочее напряжение $\text{кг}/\text{см}^2$	Коэф. запаса $K = \frac{\sigma}{\sigma_r}$	Нагрузка при испытании в кг	Вид и толщина облицовки в мм
1	1		1	72,48	2700	46	1443	1,87	104.400	
2	2		2	72,48	$\frac{2500}{2700}$	46	1443	$\frac{1,73}{1,87}$	104.400	Заполнение

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	<p>2N1222</p>	2	72,48	2600 2800	46	1443	$\frac{1,80}{1,93}$	104.400	Штукатурка 25 по сетке
4	<p>2N1222</p>	2	72,48	2500 2500	46	1443	$\frac{1,73}{1,73}$	104.400	Штукатурка 25 и заполнение
5	<p>2N1222</p>	2	72,48	2700 2510	46	1443	$\frac{1,87}{1,74}$	104.400	1/4 кирпича, штукатурка 25

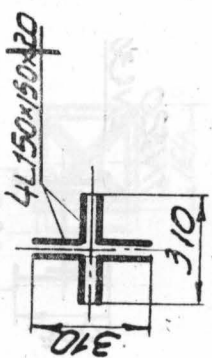
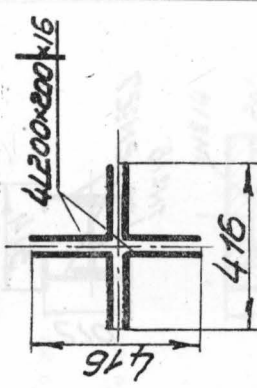
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6		2	73,2	2950 2650	48	1695 1520	1,74 1,74	124.000 111.500	1/4 кирпича, штук катурка 25
7		2	73,2	2600 2,00	48	1490 1550	1,74 1,74	109.500 113.500	То же, но с ча- стичным запол- нением
8	То же по 580x490	2	73,2	2600 2550	48	1490 1462	1,74 1,74	109.500 107.000	1/2 кирпича, штук катурка 25
9	То же	2	73,2	2850 2650	48	1635 1520	1,74 1,74	120.000 111.500	1/2 кирпича, штук катурка 25, с частичным за- полнением

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	То же, но 460×370	2	73,2	2650 2750	48	1520 1580	1,74 1,74	111.500 115.000	Гипсовые плиты с0, штукатурка 25
11	То же	2	73,2	2950 2600	48	1695 1490	1,74 1,74	124.000 109.500	То же, но с ча- стичным заплот- нением
12		2	76,8	2500 2500	88	1142 1142	2,18 2,18	87.800 87.800	Керамические ше- стикальные камни, толщи- ной 100, штука- турка 25, по ст. проволоке
13		2	76,8	2500 2500	88	1142 1142	2,18 2,18	87.800 87.800	То же с заплотне- нием



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
14		1	34,6	3600	123	977	$\frac{1,4}{3,69}$	33.800	Штукатурка 25 по ст. сетке
15	То же	2	34,6	3600	123	$\frac{690}{690}$	$\frac{1,98}{5,22}$	$\frac{23.900}{23.900}$	То же
16	То же	2	34,6	3600	123	$\frac{548}{548}$	$\frac{2,5}{6,56}$	$\frac{19.000}{19.000}$	То же
17		2	89,9	$\frac{2500}{2500}$	50	$\frac{807}{807}$	$\frac{3,1}{3,1}$	$\frac{72.500}{72.500}$	$\frac{1}{4}$ кирпича

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
18		2	130,6	$\frac{2625}{2900}$	40	$\frac{847}{935}$	$\frac{3,1}{3,1}$	$\frac{111.000}{122.000}$	To же
19		2	150,6	$\frac{2700}{2700}$	45	$\frac{1460}{1460}$	$\frac{1,85}{1,85}$	$\frac{219.000}{219.000}$	To же
20		2	170,0	$\frac{2400}{2400}$	40,5	$\frac{775}{775}$	$\frac{3,1}{3,1}$	$\frac{132.000}{132.000}$	To же

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
21		2	225	$\frac{3450}{3450}$	59	$\frac{968}{968}$	$\frac{3,56}{3,56}$	$\frac{218.000}{218.000}$	То же
22		2	248	$\frac{2500}{2500}$	44,5	$\frac{807}{807}$	$\frac{3,10}{3,10}$	$\frac{200.000}{200.000}$	То же

## ПРИМЕЧАНИЯ:

1. Раствор штукатурки колонн (кроме облицованных гипсовыми плитами) состава 1 : 1 : 5 — цемент, из-весть, песок; в колоннах, облицованных гипсовыми плитами, — состава 1 : 0,2 : 2,5 — гипс, известь, песок.
2. Раствор заполнения — шлако-бетонный  $R_{28} = 4 \div 9$  кг/см<sup>2</sup>; в колоннах, облицованных гипсовыми плитами, раствор заполнения — гипсошлакобетон  $R_{28} = 4$  кг/см<sup>2</sup>.

3. В графах 5, 7, 8 и 9 таблицы в числителе и знаменателе дроби показаны значения  $\sigma_r$ ,  $\sigma$ ,  $\sigma$  и нагрузок для каждого из 2-х однотипных образцов колонн. Значения  $\sigma_r$  — минимальные, полученные при испытании стандартных образцов стали, взятых в количестве 3 шт. из каждого элемента стержней колонн. Для гибких стержней  $\lambda > 100$  — в числителе дроби —  $K_y$ ; в знаменателе —  $\sigma$

Последнее условие удовлетворялось равенством между гибкостью относительно материальной оси и приведенной гибкостью (соответственно  $\lambda_x = \lambda_{пр}$ ).

Требования равноустойчивости устанавливались и для стержней сплошных колонн. Оголовки и базы (башмаки) сравнительно тяжелых колонн выполнялись в виде стальных опорных плит с траверсами и треугольными ребрами.

Размеры опорных плит принимались в зависимости от величины нагрузки на стержни этих колонн; торцы стержней фрезеровались; опорные плиты стержней — тщательно выравнивались.

Защита стальных стержней колонн с применением вяжущих (цемент, гипс, известь) и других материалов и изделий (кирпич, керамические камни) осуществлялась в соответствии с общепринятыми правилами на производство этих работ, а также путем применения некоторых дополнительных конструктивных мероприятий, обеспечивающих сохранение облицовок при воздействии на них высокой температуры.

Так, с целью улучшения устойчивости при воздействии температуры облицовки в  $1/4$  кирпича и гипсовых плит в горизонтальные швы (через два ряда кирпича и в каждом ряду при облицовке гипсовыми плитами) укладывались стальные хомуты сечением  $3,5 \div 4$  мм.

Для сохранения штукатурки в колоннах, облицованных гипсовыми плитами и керамическими камнями, грани колонн перед нанесением раствора штукатурки обматывались по спирали вязальной проволокой с шагом в среднем около 50—70 мм. Это же служило дополнительным мероприятием, в известной степени обеспечивающим устойчивость против обрушения при нагреве основного вида облицовки колонн.

В колоннах, облицованных керамическими камнями, в горизонтальные швы по углам укладывались полоски стальной сетки, что давало надежное соединение камней между собой.

В некоторых случаях, с целью предупреждения от обрушения при нагреве гипсовых плит, последние соединялись со стержнями колонн с помощью стальных петель. При этом свободные концы петель выпускались в горизонтальные швы плит.

В отдельных образцах колонн эти плиты в горизонтальных и вертикальных швах соединялись между собой гипсовым раствором, проливаемым в каналы, образованные пазами на кромках этих плит.

В колоннах, защищенных штукатуркой по стальной сетке, последние с помощью стальных прутьев, приваренных по углам стержней колонн, фиксировалась на расстоянии 8—10 мм от их ветвей или

других элементов стальных стержней, защищаемых раствором. Этой мерой обеспечивалось армирование раствора штукатурки, что должно было улучшать ее сцепление с сеткой и, следовательно, предупреждать преждевременное обрушение штукатурки при воздействии на нее высокой температуры.

В колоннах, имеющих между облицовкой и стержнями заполнение (шлакобетон, гипсошлакобетон), при заливке раствора на различных уровнях по длине колонн укладывались смягчающие асбестовые прокладки толщиной от 30 до 50 мм. Аналогичные прокладки располагались также по периметру между облицовкой и опорными плитами колонн. Указанное мероприятие осуществлялось с целью исключения облицовки из работы при нагружении стальных стержней колонн, а также невозможности ее разрушения при обжатии опорных плит стержней.

О степени целесообразности перечисленных выше мероприятий, излагается в последующих разделах работы.

## **VI. Экспериментальная часть и обсуждение результатов**

### **1. Характерные особенности поведения облицовок при испытании колонн на огнестойкость**

#### **а) Штукатурка по металлической сетке**

Для этого вида защиты стальных стержней колонн, как наиболее характерное явление, следует отметить значительное разрушение штукатурки при воздействии на нее высокой температуры.

Это проявлялось тремя основными показателями: появлением трещин на поверхности штукатурки, ее частичным или полным расслоением на отдельных участках граней колонн и, наконец, обрушением.

К показателям разрушения штукатурки следует также отнести потерю ее прочности от температуры, что устанавливалось обычно при осмотре колонн после испытания на огнестойкость.

Как правило, после прокалывания штукатурка становилась рыхлой и легко отделялась от граней колонн при легком нажатии рукой. Во всех случаях после пожара такую штукатурку колонн требовалось бы заменять новой. Образование трещин, а также расслоение штукатурки и ее обрушение на отдельных участках граней колонн ускоряло прогрев обнаженных участков стальных стержней и вызывало потерю их несущей способности (рис. 5).

#### **б) Кирпичная облицовка.**

Облицовка колонн кирпичом с дополнительной защитой последнего штукатуркой также имела свои особенности.

Во время облицовки колонн, с целью лучшего сцепления штукатурного раствора с поверхностью кирпича в кладке, оставлялись пустошвы, т. е. раствором заполнялась часть шва. Незаполненные участки швов (глубина их колеблется в среднем в пределах 8—10 мм) при последующем нанесении на грани кладки штукатурного раствора заполнялись им, что обеспечивало необходимое сцепление штукатурки с кладкой.

В результате температурного расширения облицовки и штукатурки, вызываемого прогревом, ее расслоения и снижения прочности, происходило обрушение штукатурки на отдельных участках граней колонн или по всей их поверхности.

В ряде случаев появление трещин в штукатурке наблюдалось через 5÷10 мин. от начала испытания колонн. Затем в разное время в процессе испытания происходило частичное или полное ее обрушение на отдельных гранях облицовки колонн.

Обычно же основным признаком, предшествующим обрушению штукатурки, было нарушение ее сцепления с поверхностью кирпичной облицовки. Что касается собственно кирпичной облицовки, то степень ее сохранности при нагреве определялась прежде всего толщиной облицовки: большая толщина являлась хорошей гарантией против обрушения.

Облицовка в  $\frac{1}{2}$  кирпича во всех случаях сохранялась на месте до наступления предела огнестойкости конструкций. При облицовке в  $\frac{1}{4}$  кирпича были зафиксированы случаи обрушения кирпича еще задолго до того, как стержень колонны мог прогреться до критической температуры и потерять несущую способность. В результате обрушения части кирпичной облицовки обнаженные участки стержня колонны подвергались воздействию горячих газов печи, что вскоре вызывало потерю несущей способности колонны (рис. 6).

При испытаниях колонн, в горизонтальных швах кладки которых были уложены стальные хомуты, обрушений кирпичной облицовки не наблюдалось.

Разрушение собственно кирпича, как материала, от воздействия высокой температуры проявлялось в спекании его поверхности, подверженной непосредственному воздействию горячих газов, а при более длительном нагреве кирпича (свыше 4 часов) происходило оплавление.

Оплавление кирпича в большей степени отмечалось по углам колонн, нежели на поверхности их граней; при этом температура горячих газов печи достигала порядка 1100÷1150° С. В ряде случаев разрушение кирпичной облицовки (сквозные вертикальные трещины) было связано с наличием значительных искривлений сталь-





Рис. 5. Характер разрушения штукатурки стальной колонны после 45 мин. испытания на огнестойкость.

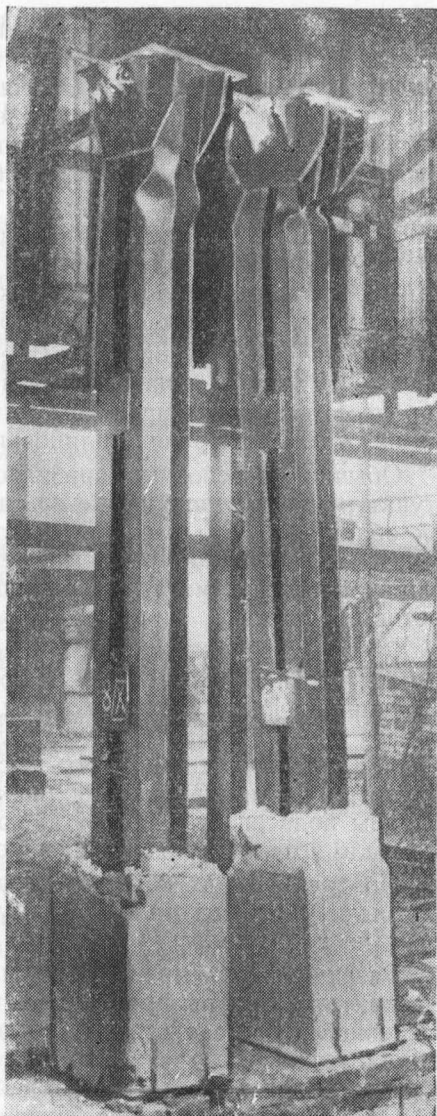


Рис. 6. Деформация стальных стержней колонн, облицованных в  $\frac{1}{4}$  кирпича, происходящая в результате обрушения облицовки у верхней опорной плиты (основная часть облицовки удалена после испытания колонн).

ных стержней (явление продольного изгиба), получаемых в процессе их потери несущей способности (рис. 7).

### **в) Керамические камни**

Этот вид изделий, как известно, имеет различный процент пустот, образуемых каналами в камнях, а также различную толщину стенок, разделяющих каналы. Указанные конструктивные особенности керамических камней в известной мере определяют их общую толщину и, как следствие, прогрев.

Испытания колонн, облицованных керамическими камнями, защищенными штукатуркой, показали, что штукатурка, армированная стальной проволокой, как правило, надежно удерживалась на месте. Однако в некоторых случаях к концу испытания наблюдалось расслоение штукатурки у поверхности кирпичной облицовки и ее обрушение (рис. 8).

Устойчивость керамических камней в процессе их нагревания надежно обеспечивалась узкими полосками металлической сетки, уложенными в горизонтальные швы облицовки.

Стальные же стержни (крестового сечения), несмотря на внешне сохранившуюся прямолинейность граней облицовки, на отдельных участках их длины (рис. 9) имели значительные деформации в виде искривлений полукругом.

### **г) Гипсовые плиты**

В результате появления на поверхности гипсовых плит сети глубоких трещин, при испытаниях этих колонн на огнестойкость происходило обрушение плит.

Их обрушению в разное время от начала испытания (в зависимости от толщины плит) предшествовало частичное разрушение штукатурки. Затем наблюдалось все увеличивающееся во времени раскрытие горизонтальных и вертикальных швов, скалывание гипса по углам колонн и, наконец, обрушение плит с обнажением стальных стержней колонн (рис. 10). Это вызывало скачкообразный рост температуры обнаженных участков стальных стержней колонн, их деформации и потерю несущей способности.

## **2. Изменение температуры и деформации колонн**

Согласно методике, нагрузка, передаваемая стальным стержням колонн в процессе их испытания на огнестойкость, оставалась постоянной.

По мере прогрева облицовки отмечалось удлинение стальных стержней колонн (рис. 11). Это удлинение в течение определенного

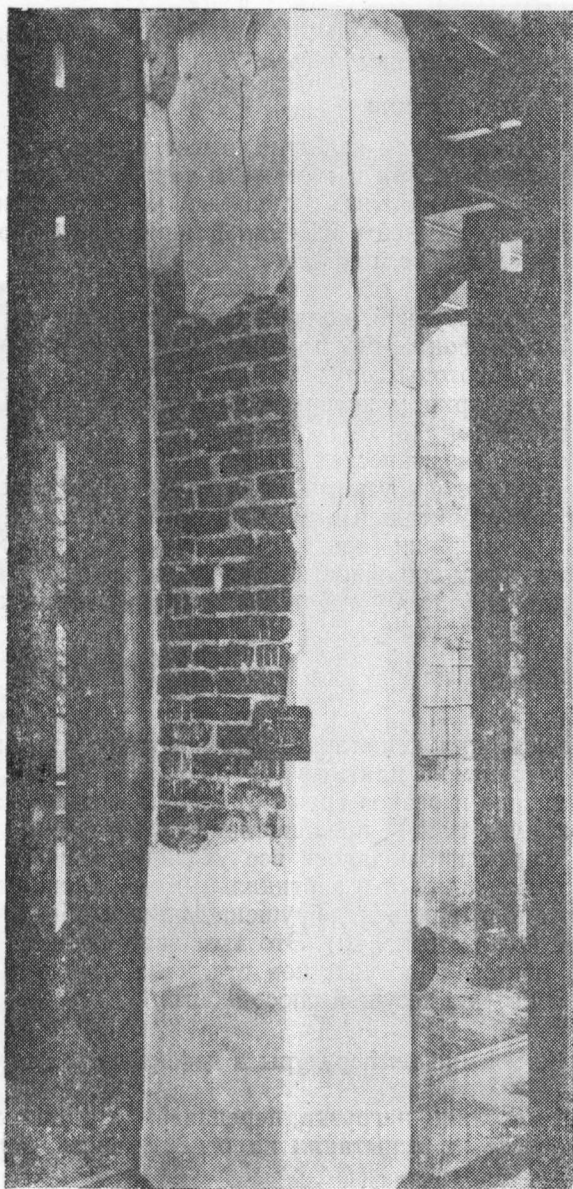


Рис. 7. Разрушение кирпичной облицовки (120 мм) колонны (вертикальные сквозные трещины), полученное в результате искривления стального стержня в момент потери несущей способности.

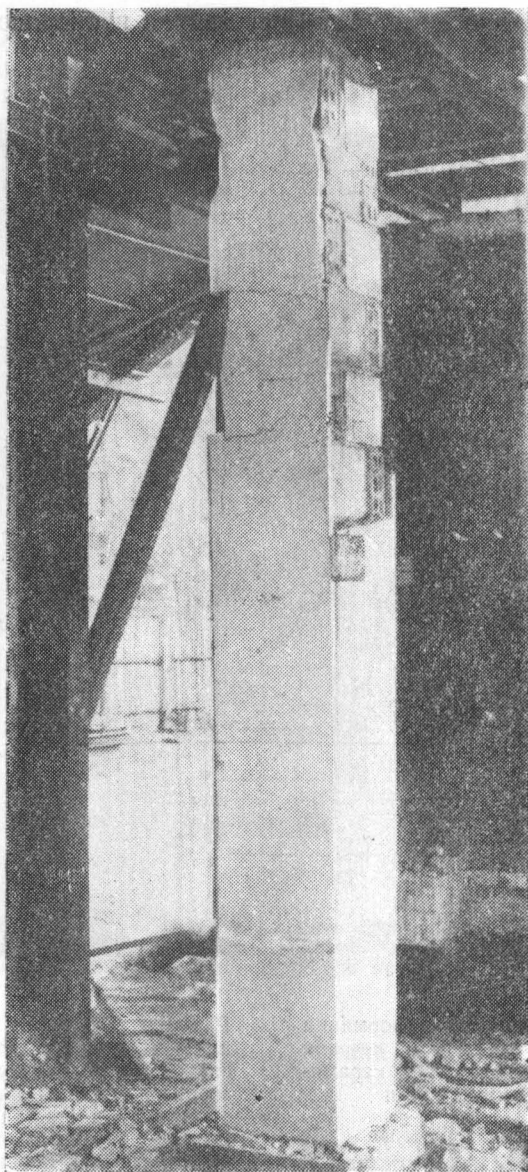


Рис. 8. Обрушение штукатурки в колонне, облицованной керамическими камнями.

времени от начала испытания происходило пропорционально изменению температуры нагреваемого стержня.

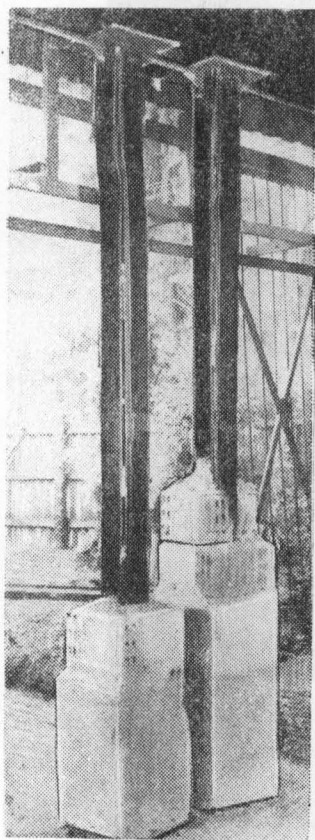


Рис. 9. Характер деформации стержней крестового сечения при облицовке колонн керамическими камнями

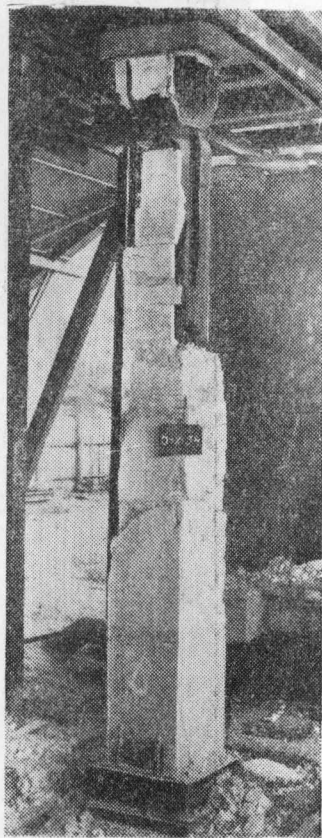


Рис. 10. Обрушение гипсовых плит и характер деформации стального стержня колонны, вызванный быстрым нагреванием обнаженного участка колонны. Первое обрушение было отмечено у верхней опорной плиты колонны.



Затем наблюдалась кратковременная стабилизация роста деформации, что характеризовало, с одной стороны, продолжающееся удлинение нагретого стержня колонны, с другой — его укорочение в связи с началом развития пластических деформаций стали под нагрузкой.

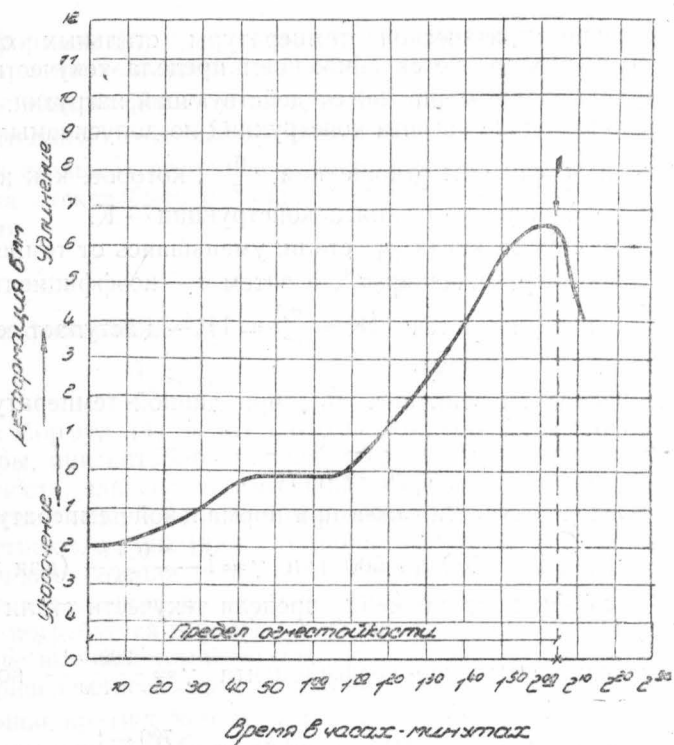


Рис. 11. Кривая деформации стальных колонн при испытании на огнестойкость.

Дальнейший рост температуры стержня колонны приводил к нарушению однозначной связи между ростом температуры стержней и их деформацией.

В то время как температура стержня продолжала возрастать, происходило укорочение и искривление стержня, нагрузка в прессе заметно снижалась — конструкция утрачивала несущую способность.

Это явление на рис. 11 отмечено отклонением кривой изменения деформации в сторону оси абсцисс.



Отрезок времени, исчисляемый от начала испытания до момента потери несущей способности конструкции, принимался за величину ее предела огнестойкости.

### 3. Критические температуры и коэффициент запаса колонн

Наступление критической температуры стальных стержней (Ст-3, Ст-5) характеризуется снижением предела текучести стали ( $\sigma_T$ ) до величины напряжения ( $\sigma$ ) от действующей нагрузки.

Согласно методике расчета конструкций по допускаемым напряжениям,  $\sigma_T$  и  $\sigma$  связаны отношением  $\frac{\sigma_T}{\sigma}$ , которое, как известно, называется коэффициентом запаса конструкции —  $K$ .

В частном случае, когда  $\sigma_T$  стали, уменьшаясь от температуры, достигает, например, значения  $\sigma_T^t$ , а затем  $\sigma$  — коэффициент запаса конструкции исчерпывается ( $K = \frac{\sigma_T^t}{\sigma} = 1$ ) — наступает ее предел огнестойкости.

Для определения величины  $\sigma_T^t$  при данной температуре воспользуемся формулой

$$\sigma_T^t = \sigma_T \cdot \gamma, \quad (1)$$

где:  $\sigma_T$  — предел текучести стали при нормальной температуре;

$\gamma = \frac{700-t}{400}$  (для  $t$  от 400 до 500°) и  $\gamma = 1 - \frac{0,4t}{500}$  (для  $t$  от 20° до 400°) — коэффициент снижения предела текучести стали от температуры.

Фактически применение коэффициента  $\gamma = \frac{700-t}{400}$  возможно и при значениях  $t > 500^\circ$ .

Подставляя в формулу (1) значение  $\gamma = \frac{700-t}{400}$ , получим:

$$\sigma_T^t = \sigma_T \left( \frac{700-t}{400} \right). \quad (2)$$

При достижении стальным стержнем колонны критической температуры, при которой  $\sigma_T^t = \sigma$ , формула (2) примет вид:

$$\sigma = \sigma_T \left( \frac{700-t_k}{400} \right)$$

или

$$\gamma = \frac{\sigma}{\sigma_T} = \frac{700-t_k}{400}. \quad (3)$$

Из последнего выражения следует, что в частном случае  $\gamma$  есть не что иное как обратная величина коэффициента запаса, т. е.

$$\frac{1}{K} = \gamma = \frac{700 - t_k}{400}.$$

Решая это выражение относительно  $t_k$ , получим:

$$t_k = 700 \left( 1 - \frac{1}{1,75 \cdot K} \right). \quad (4)$$

В формуле (4)  $t_k$  есть критическая температура стального элемента при данном значении коэффициента запаса  $K$ . Расчеты по указанной выше формуле показывают, что значение  $t_k$  имеют удовлетворительную сходимость с опытными данными при  $K \geq 1,6$ .

Для стальных стержней колонн, имеющих  $K \leq 1,6$ , аналогичная формула может быть получена путем подстановки в формулу (1) значения

$$\gamma = 1 - \frac{0,4 t}{500}.$$

Эта формула имеет следующий вид:

$$t_k = 1250 \left( 1 - \frac{\sigma}{\sigma_T} \right) = 1250 \left( 1 - \frac{1}{K} \right). \quad (5)$$

Из формул (4) и (5) следует, что величина критической температуры, при которой стальной стержень колонны теряет несущую способность, зависит от величины коэффициента запаса: чем больше  $K$ , тем больше  $t_k$ , но при прочих одинаковых конструктивных параметрах колонны (вид и толщина материала облицовки, площадь поперечного сечения стального стержня и др.) — тем, очевидно, больше и величина ее предела огнестойкости, поскольку в данном случае потребуется и больше времени для нагрева стержня колонны до более высокой температуры.

Приведем несколько примеров, подтверждающих связь между величиной критической температуры ( $t_k$ ) и коэффициентом запаса ( $K$ ) конструкции. Для колонны, представленной в таблице 1 за № 1, имеем —  $\sigma_T = 2700 \text{ кг/см}^2$  и  $\sigma = 1443 \text{ кг/см}^2$ .

При наступлении предела огнестойкости колонны, т. е. при достижении стержнем критической температуры,

$$t_k = \sigma.$$

Отсюда, согласно формуле (4):

$$t_k = 700 \left( 1 - \frac{1}{1,75 \cdot \frac{2700}{1443}} \right) = 486^\circ.$$

Из рассмотрения графика, приведенного на рис. 12, к двенадцатой минуте от начала испытания (т. е. к наступлению предела огнестойкости колонны) средняя температура стержня была равна примерно  $480^{\circ}$ .

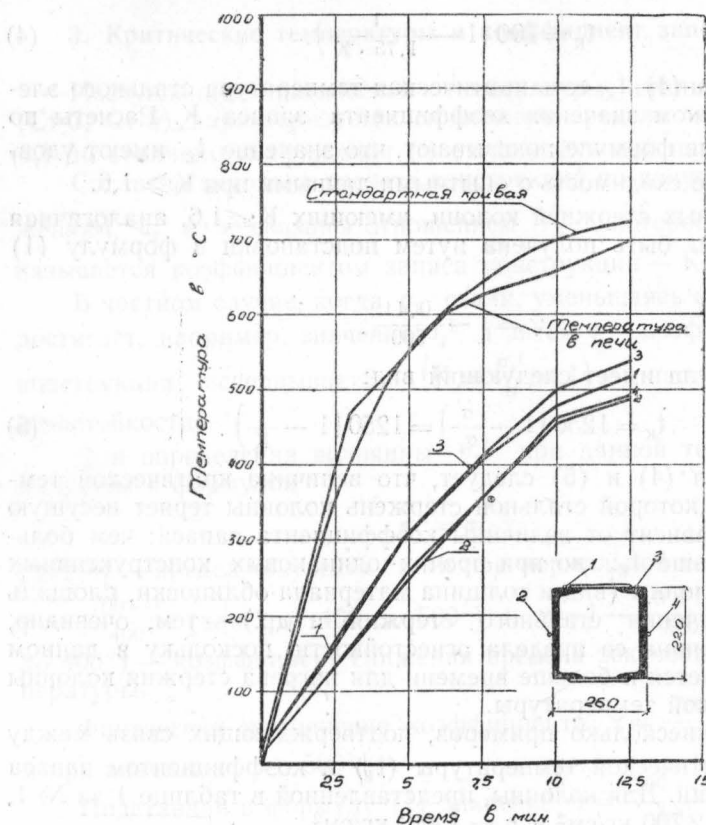


Рис. 12. График изменения температуры стальной колонны, не имеющей облицовки.

Приведем еще один пример:

Для колонны № 8, указанной в таблице 1,  $\sigma_T = 2600 \text{ кг/см}^2$   
 $\sigma = 1490 \text{ кг/см}^2$  откуда  $K = 1,74$ .

Критическая температура:

$$t_k = 700 \left( 1 - \frac{1}{1,75 \cdot 1,74} \right) = 470^\circ$$

Из графика на рис. 13 значение критической температуры в колонне  $t_k \approx 470^\circ$  было отмечено примерно через 6 час. 30 мин.; изменение знака деформаций, свидетельствующие о наступлении предела огнестойкости этой колонны, было также отмечено примерно к 6 час. 30 мин. (рис. 14).

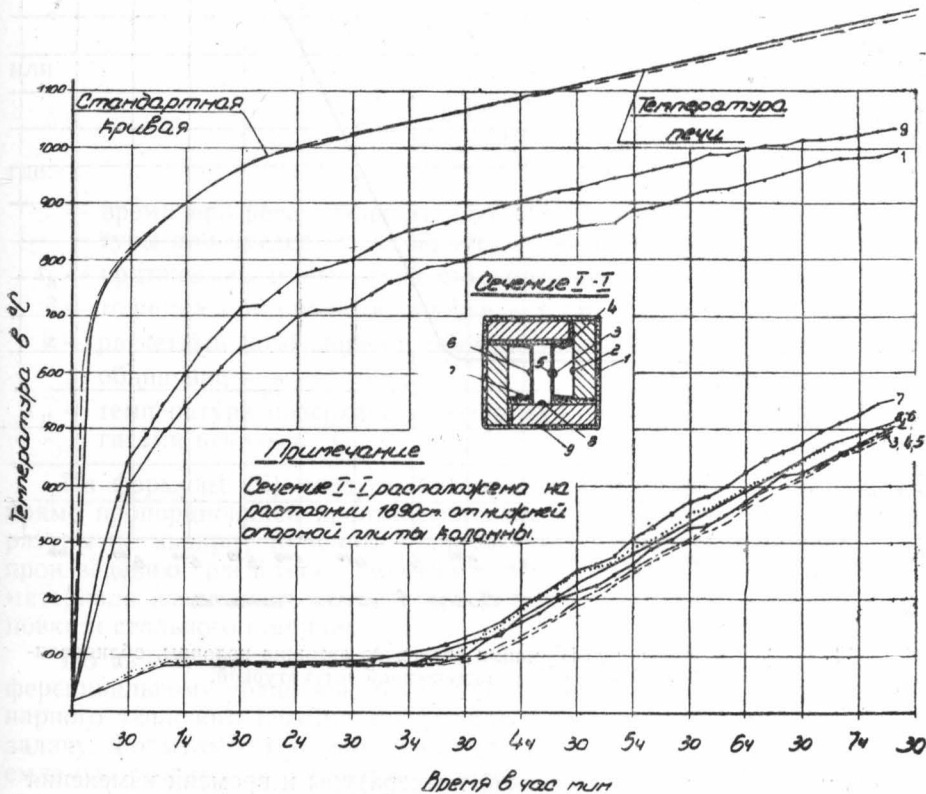


Рис. 13. График изменения температуры колонны, облицованной  $\frac{1}{2}$  кирпича и защищенной штукатуркой.

Эти примеры, число которых при необходимости можно было бы значительно увеличить, подтверждают полную взаимосвязь между величиной критической температуры и коэффициентом запаса конструкции. Полное совпадение времени, при котором стальной стер-

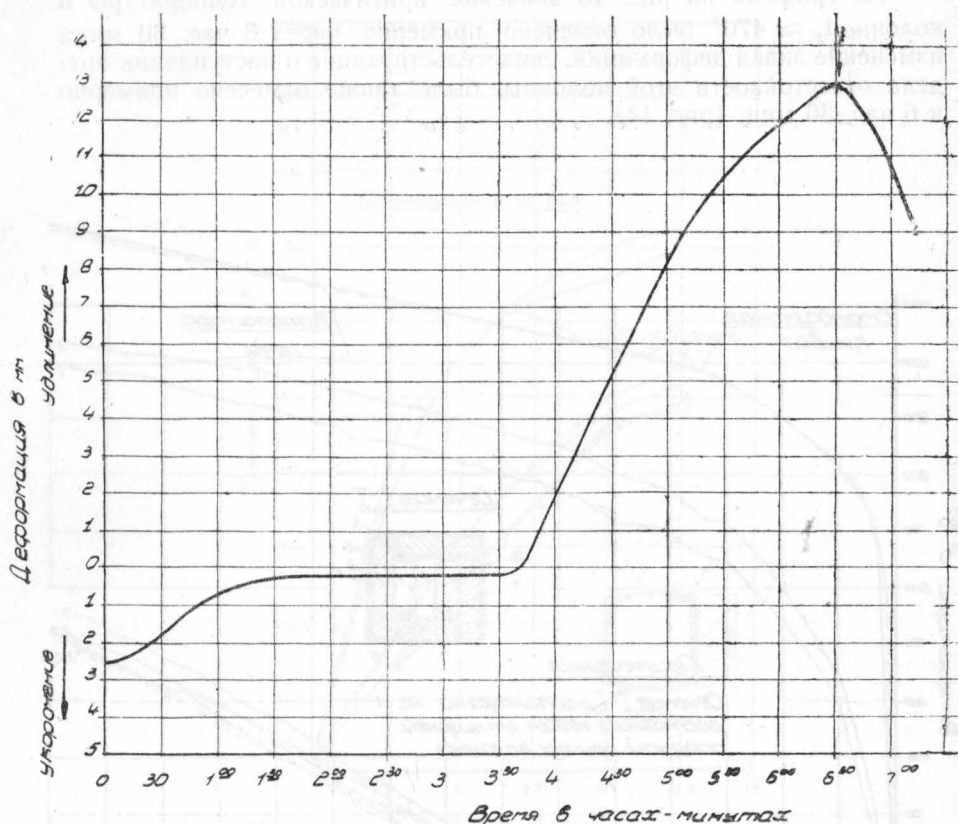


Рис. 14. График изменения деформации стального стержня колонны, облицованной в  $\frac{1}{2}$  кирпича и защищенной штукатуркой.

жень нагревается до критической температуры и времени изменения знака деформации (наклон кривой деформации в сторону оси абсцисс после «периода удлинения» стержня от температуры), подтверждают мысль о том, что каждому коэффициенту запаса соответ-

ствуется определенная величина критической температуры; при достижении этой температуры несущая способность конструкции исчерпывается.

#### 4. Определение пределов огнестойкости колонн расчетным путем

Обобщение результатов испытания колонн на огнестойкость позволило принять для расчета времени прогрева их стальных стержней до критической температуры следующую эмпирическую формулу:

$$\frac{t_k}{\tau} = \alpha \frac{T_n - t_k}{\delta^2}$$

или

$$\tau = \frac{t_k \cdot \delta^2}{\alpha (T_n - t_k)}, \quad (6)$$

где:

$\tau$  — время прогрева стального стержня до критической температуры или предел огнестойкости колонны — в мин.

$t_k$  — критическая температура стального стержня — в °C;

$\delta$  — толщина материала облицовки — в см;

$\alpha$  — расчетный коэффициент температуропроводности материала облицовки — в см<sup>2</sup>/мин.;

$T_n$  — температура поверхности облицовки, обогреваемой горячими газами печи — в °C;

Из формулы (6) следует, что предел огнестойкости колонны прямо пропорционален произведению величины критической температуры на квадрат толщины облицовки и обратно пропорционален произведению расчетного коэффициента температуропроводности материала на разность температур обогреваемой поверхности облицовки и стального стержня.

По своему физическому смыслу формула (6) аналогична дифференциальному уравнению Фурье, решение которого для нестационарного теплового режима представляет трудную математическую задачу. Формула (6) значительно упрощает ее решение и дает приемлемую сходимость расчетных данных о пределах огнестойкости колонн с опытными их значениями.

В формуле (6) величина  $t_k$  зависит от коэффициента запаса конструкции. Так, для  $K \geq 1,6$   $t_k$  принимается согласно формуле



(4); для  $K \geq 1,6$  — согласно формуле (5). В формуле (6)  $t_k$  приравнивается к значению температуры поверхности облицовки, обращенной к стальному стержню колонны.

Как показал анализ опытных данных, такое допущение возможно для стержней колонн, имеющих небольшие площади поперечного сечения (в среднем до  $70 \div 75 \text{ см}^2$ ). В этом случае температура стержня и внутренней поверхности облицовки в конце опыта являются практически одинаковыми.

Согласно опытным данным, температура наружной поверхности облицовки, т. е. непосредственно обогреваемой горячими газами, может быть выражена следующим образом:

$$T_{\Pi} = 550 + 3,8\tau \quad (7)$$

и

$$T_{\Pi} = 815 + 0,86\tau. \quad (8)$$

Зависимость (7) является справедливой для пожара длительно до 1,5 час.; зависимость (8) — для пожара свыше 1,5 часов.

Перепишем формулу (6) в следующем виде:

$$\tau \cdot \alpha (T_{\Pi} - t_k) = t_k \delta^2.$$

Заменим  $T_{\Pi}$  его значением, равным

$$T_{\Pi} = 815 + 0,86 \cdot \tau$$

(для  $\tau > 1,5$  час.).

Путем ряда преобразований напомним:

$$\tau^2 + 948\tau \left(1 - \frac{t_k}{815}\right) - \frac{1,16 \cdot t_k \cdot \delta^2}{\alpha} = 0,$$

откуда:

$$\tau = -474 \left(1 - \frac{t_k}{815}\right) \pm \sqrt{\left[474 \left(1 - \frac{t_k}{815}\right)\right]^2 + \frac{1,16 \cdot t_k \cdot \delta^2}{\alpha}}. \quad (9^*)$$

Подставляя в формулу (9) значение  $t_k$  для  $K \geq 1,6$  и произведя некоторые преобразования, напомним окончательно:

$$\tau = -66 \left(1 + \frac{3,53}{K}\right) + \sqrt{\left[66 \left(1 + \frac{3,53}{K}\right)\right]^2 + \frac{812 \left(1 - 0,571 \frac{1}{K}\right) \delta^2}{\alpha}}. \quad (10)$$

\*) При расчете по формуле (9), а также указанным ниже формулам выражение под знаком радикала принимается только с плюсом.

В данном случае коэффициент запаса  $K$  получен из выражения  $t_k = 700 \left(1 - \frac{1}{1,75 \cdot K}\right)$ , справедливого для  $t_k \geq 400^\circ$ . Из этого следует, что расчет по формуле (10) будет справедлив при  $K \geq 1,6$  и  $\tau \geq 1,5$  часов. Для значений  $K \leq 1,6$ , а также  $\tau \leq 1,5$  часов, или  $\tau \geq 1,5$  часов по аналогии с формулой (10), получены другие формулы. В частности, для  $K \leq 1,6$  и  $\tau \geq 1,5$  часов расчетная формула имеет вид:

$$\tau = 256 \left(1 - \frac{2,85}{K}\right) + \sqrt{\left[256 \left(1 - \frac{2,85}{K}\right)\right]^2 + \frac{1450 \left(1 - \frac{1}{K}\right) \delta^2}{a}}. \quad (11)$$

Поскольку наличие нескольких формул для расчета пределов огнестойкости стальных колонн может затруднить их применение, представляется возможным ограничиться лишь формулами (10) и (11). Опыты показали, что предел огнестойкости, равный не более 1,5 часов, обычно имеют колонны с небольшой толщиной облицовки. Так, в среднем при  $20 \div 25$  мм слое \*) штукатурки и  $K = 1,6 \div 2$ , предел огнестойкости колонны не превышает  $45 \div 60$  мин.

Только при  $K > 2$  (до 3 и больше) и слое штукатурки в  $25 \div 30$  мм величина предела огнестойкости колонны достигает  $1,3 \div 1,5$  часов.

Поскольку обычно большинство материалов, используемых для облицовки стальных колонн, дает пределы огнестойкости выше 1,5 часов, то практический интерес представляют прежде всего формулы (10) и (11).

Из формул (10) и (11) следует, что предел огнестойкости колонн с площадью сечения стального стержня примерно до  $70 \text{ см}^2$  зависит от величины коэффициента запаса « $K$ », определяемого отношением предела текучести стали  $\sigma_T$  к напряжению  $\sigma$  от действующей нагрузки, толщины  $\delta$  и расчетного коэффициента температуропроводности  $a$  материала облицовки. В этих формулах « $a$ » является величиной переменной, зависящей не только от вида материала, но и температуры его нагрева.

\*) Имеется в виду обычная цементно-известково-песчаная штукатурка. Прогрев такого же слоя гипсовой штукатурки происходит значительно медленнее.

С целью определения этого коэффициента\*) были испытаны модели стальных колонн, с длиной стержней равной 1,5 м; в качестве облицовки в моделях были использованы: обыкновенный глиняный кирпич ( $1\frac{1}{2}$  и  $\frac{1}{4}$  кирпича), многодырчатый кирпич ( $\frac{1}{2}$  кирпича), керамические камни с различным процентом пустот, образуемых каналами, штукатурка по сетке толщиной в 25 и 50 мм и гипсовые плиты.

Модели колонн были испытаны на прогрев без нагрузки по стандартной кривой; при испытаниях осуществлялся контроль за изменением температуры наружной и внутренней поверхностей облицовок, а также стального стержня модели.

На основании данных о прогреве моделей были получены расчетные величины коэффициента теплопроводности (а) облицовок.

Усредненные значения «а» в зависимости от температуры приведены в таблице 2.

**Расчетные величины  
коэффициента теплопроводности «а» материалов,  
используемых для облицовки колонн**

Таблица 2

Вид материала облицовки	Температура в °С			
	433	500	540	600
Известково-цементная штукатурка . . . .	0,200	0,223	0,242	0,274
Кирпич обыкновенный глиняный . . . . .	0,332	0,378	0,410	0,450
Кирпич глиняный дырчатый . . . . .	0,395	0,467	0,507	0,560
Керамические камни . . . . .	0,184	0,196	0,214	0,240
Гипсовые плиты, армированные древесной стружкой . . . . .	0,131	0,188	0,193	0,202

**Примечание.** Значения «а» для гипсовых плит, ввиду их преждевременного обрушения при воздействии высокой температуры, получены не были. Указанные в табл. 2 данные для гипсовых плит подсчитаны на основании иностранных источников об испытании стальных колонн, облицованных гипсовыми плитами.

\*) Испытания проведены инж. Зенковым Н. И. совместно с автором.

## 5. О возможности аналитического определения пределов огнестойкости колонн, рассчитанных по методике предельных состояний

Согласно методике расчета конструкций на прочность и устойчивость по предельному состоянию, расчетная продольная сила центрально сжатого элемента определяется по формулам:

$$\text{на прочность} — N \leq m \cdot R \cdot F_{\text{нт}}$$

и

$$\text{на устойчивость} — N \leq m\varphi \cdot R \cdot F_{\text{бр}},$$

где:  $N$  — расчетная продольная сила;

$m$  — коэффициент условий работы;

$R$  — расчетное сопротивление сжатию ( $R = k\sigma_T^H$ , здесь:

$k$  — коэффициент однородности материала;

$\sigma_T^H$  — нормативный предел текучести);

$\varphi$  — коэффициент продольного изгиба;

$F_{\text{нт}}$  и  $F_{\text{бр}}$  — площадь сечения нетто и брутто.

Расчетное усилие  $N$  при основном сочетании постоянной ( $P^H$ ) и полезной ( $Q^H$ ) нормативных нагрузок, умноженных на соответствующие коэффициенты перегрузки « $n$ », равняется:

$$N = P^H \cdot n + Q^H \cdot n_1 + \dots \leq F \cdot \sigma_T^H \cdot k \cdot m,$$

откуда:

$$\frac{P^H \cdot n + Q^H \cdot n_1 + \dots}{m \cdot k} \leq F \cdot \sigma_T^H = N_{\text{разр}},$$

или

$$\frac{N_{\text{разр}}}{P^H + Q^H + \dots} \geq \frac{P^H n + Q^H n_1 + \dots}{mk (P^H + Q^H + \dots)} \quad (14)$$

Правая часть неравенства (14) представляет собой не что иное, как коэффициент запаса.

Если коэффициент перегрузки « $n$ » для всех нормативных нагрузок данного элемента конструкции будет одинаков, то неравенство (14) перепишется в следующем виде:

$$\frac{N_{\text{разр}}}{P^H + Q^H + \dots} \geq \frac{n}{mk},$$

где  $\frac{n}{mk}$  — коэффициент запаса для напряжения  $\sigma^H$  от нормативной нагрузки по отношению к нормативному пределу текучести  $\sigma_T^H$ , т. е.

$$\frac{F\sigma_T^H}{N^H} \geq \frac{n}{mk},$$

или:

$$\frac{\sigma_T^H}{\sigma^H} \geq \frac{n}{mk}.$$

Таким образом формулы (10) и (11) для расчета пределов огнестойкости колонн применимы также и при расчетах стальных стержней по предельному состоянию.

Однако в этом случае общий коэффициент запаса  $k = \frac{\sigma_T}{[\sigma]}$  в формулах (10) и (11) будет заменен тремя коэффициентами  $n$ ,  $m$  и  $k$ , дающими при определенных сочетаниях различные коэффициенты запаса.

## 6. Примеры расчета пределов огнестойкости колонн

Прежде чем привести несколько примеров расчета пределов огнестойкости по формулам (10) и (11) необходимо отметить следующее.

В процессе испытаний на огнестойкость штукатурка, нанесенная на грани колонн (при кирпичной облицовке и др.), обычно через некоторое время от начала испытания отслаивалась или на отдельных участках граней отпадала.

Вследствие этого при расчете не представляется возможным вводить толщину штукатурки в общую величину « $\delta$ ». Кроме этого, как следует из таблицы 2, расчетный коэффициент температуропроводности штукатурки отличается от этой характеристики других видов облицовок.

Поэтому при расчете к полученной величине предела огнестойкости колонны (с учетом основного вида облицовки — кирпичная и т. д.) проще прибавлять время, в течение которого данный слой штукатурки может защищать конструкцию от нагревания до критической температуры.

Принимая во внимание изложенное выше, приведем несколько примеров расчета предела огнестойкости колонн.

**Пример:** 1. Стальная колонна, облицованная в  $1/4$  кирпича и защищенная 25 мм слоем обычной штукатурки.

$$K = \frac{\sigma_T}{\sigma} = 1,74.$$

При  $K = 1,74$  критическая температура

$$t_k = 700 \left( 1 - \frac{1}{1,75 \cdot 1,74} \right) = 470^\circ,$$

тогда согласно табл. 2  $a = 0,350 \text{ см}^2/\text{мин}$ .

Подставляя известные величины в формулу (10), получим:

$$\begin{aligned} \tau &= -66 \left( 1 + \frac{3,53}{1,74} \right) + \\ &+ \sqrt{\left[ 66 \left( 1 + \frac{3,53}{1,74} \right) \right]^2 + \frac{812 \left( 1 - 0,571 \frac{1}{1,74} \right) 42,2}{0,350}} = \\ &= -200 + \sqrt{105\,400} = 122 \text{ мин.} \approx 2 \text{ часа.} \end{aligned}$$

Таким образом предел огнестойкости  $\tau = 2$  часа получен для облицовки в  $1/4$  кирпича. Чтобы учесть влияние штукатурки  $\delta = 25$  мм к указанному времени необходимо прибавить еще  $45 \div 50$  мин.

Итак, полный предел огнестойкости колонны будет равен 2 час. 50 мин.

Согласно опытным данным, аналогичные колонны с  $K=1,74$  имели предел огнестойкости 2 часа 34 мин. и 2 часа 40 мин. (см. таблицу 3).

**Пример 2.** Колонна, облицованная в  $1/2$  кирпича, дополнительно защищена 25 мм слоем штукатурки. Коэффициент запаса  $K=1,74$ .

В этом случае:

$$\begin{aligned} \tau &= -66 \left( 1 + \frac{3,53}{1,74} \right) + \\ &+ \sqrt{\left[ 66 \left( 1 + \frac{3,53}{1,74} \right) \right]^2 + \frac{812 \left( 1 - 0,571 \frac{1}{1,74} \right) 144}{0,350}} = \\ &= -200 + \sqrt{265\,000} = -200 + 515 = 315 \text{ мин. или 5 часов 15 мин.} \end{aligned}$$

По аналогии с предыдущим примером, учитывая роль штукатурки, получим полный предел огнестойкости колонны, равным примерно:

$$\tau = 5 \text{ час. 15 мин.} + 50 \text{ мин.} = 6 \text{ час. 5 мин.}$$

По опытным данным (см. табл. 3) при  $K=1,74$  колонны, облицованные в  $1/2$  кирпича, имели пределы огнестойкости 6 час. 10 мин. и 6 час. 30 мин.

Из указанных примеров видно, что расчетные значения пределов огнестойкости колонн, полученные по формуле (10) довольно близки к опытным данным.

В колоннах, облицованных керамическими камнями, в расчет принимается не общая толщина камня, а приведенная толщина стенок, разделяющих каналы камней. В этом случае роль каналов, заполненных воздухом, учитывается расчетным коэффициентом температуропроводности керамической облицовки.



Данные о пределах огнестойкости стальных колонн

Таблица 3

№ п/п	№ № в соответствии с табл. 1	Краткое описание стального стержня и облицовки	Предел огнестойкости		$k = \frac{\sigma_T}{\sigma}$	Температура $t^\circ$ стержней колонн к наступлению предела огнестойкости в $^\circ\text{C}$	Примечание
			час.	мин.			
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	Стальная незащищенная колонна из двух швеллеров № 22 ( $F=73 \text{ см}^2$ ) полками внутрь . . . . .	—	12,0	1,87	$470 \div 480$	
2	2	То же с заполнением пространства между двумя швеллерами шлакобетоном . . . .	—	13	1,73	470	
3	2	То же . . . . .	—	15	1,87	430, макс. $t^\circ$ не замерена	
4	3	Стальная колонна из двух швеллеров № 22, защищенная 25 мм слоем штукатурки по металлической сетке .	—	45	1,80	400, макс. $t^\circ$ не замерена	
5	3	То же . . . . .	—	47	1,93	480	
6	4	Стальная оштукатуренная (25 мм) колонна из двух швеллеров № 22 с заполнением пространства между швеллерами шлакобетоном .	—	57,5	1,73	475	
7	4	То же . . . . .	1	5	1,73	470	

1	2	3	4	5	6	7	8
8	5	Стальная колонна из двух швеллеров № 22 полками внутрь, облицованная в $\frac{1}{4}$ кирпича с дополнительной защитой облицовки 25 мм слоем штукатурки . . . . .	1	30	1,87	до 500	При испытании было отмечено преждевременное разрушение части кирпичной облицовки
9	5	То же . . . . .	2	40	1,74	475	
10	6	Стальная колонна из двух швеллеров № 20 полками наружу ( $F=73,2 \text{ см}^2$ ), облицованная в $\frac{1}{4}$ кирпича с дополнительной защитой облицовки 25 мм слоем штукатурки . . . . .	2	34	1,74	480	
11	6	То же . . . . .	2	45	1,74	480	
12	7	Аналогичная с предыдущей колонна, но с заполнением пространства между швеллерами и облицовкой шлакобетоном . . . . .	3	25	1,74	480	
13	7	То же . . . . .	3	40	1,74	475	

1	2	3	4	5	6	7	8
14	8	Стальная колонна из двух швеллеров № 20 полками наружу облицованная в $\frac{1}{2}$ кирпича с дополнительной защитой облицовки 25 мм слоем штукатурки . . . . .	6	30	1,74	480	
15	8	То же . . . . .	6	10	1,74	475	
16	9	Аналогичная с предыдущей колонна, но с заполнением пространства между швеллерами и облицовкой шлакобетоном . . . . .	7	50	1,74	475	
17	9	То же . . . . .	7	40	1,74	480	
18	10	Стальная колонна из двух швеллеров № 20 полками наружу, облицованная гипсовыми плитами толщиной 60 мм с дополнительной защитой плит 25 мм слоем штукатурки . . . . .	4	45*	1,74	макс. t° 600 миним. t° 150	* Вследствие преждевременного обрушения плит пределы огнестойкости колонны занижены
19	10	То же . . . . .	4	42*	1,74	макс. t° не зафиксирована мин. 150	

1	2	3	4	5	6	7	8
20	11	Аналогичная колонна, облицованная гипсовыми плитами, но с заполнением пространства между швеллерами и плитами гипсошлакобетоном	5	40*	1,74	мин. $t^{\circ}$ 250, макс. $t^{\circ}$ 530	* К 5 час. 35 мин. от начала испытания было отмечено обрушение нескольких плит
21	11	То же . . . . .	4	10*	1,74	мин. $t^{\circ}$ 100, макс. $t^{\circ}$ не замерена	* К 4 час. от начала испытания было отмечено обрушение нескольких плит
22	12	Стальная колонна крестового сечения из четырех уголков № 10 ( $F=76,8 \text{ см}^2$ ), облицованная керамическими шестиканальными камнями ( $\delta=100 \text{ мм}$ ) с дополнительной защитой камней 25 мм слоем штукатурки . . . . .	4	00	2,18	510	
23	12	То же . . . . .	3	55	2,18	510	
24	13	Аналогичная с предыдущей колонна, но с заполнением пространства между стержнем и облицовкой шлакобетоном . . . . .	4	40	2,18	500	
25	13	То же . . . . .	5	15	2,18	500	

1	2	3	4	5	6	7	8
26	14	Колонна крестового сечения из сваренных между собой пластин ( $F=34,6 \text{ см}^2$ ), зашплиценная 25 мм слоем штукатурки по металлической сетке . . . . .	1	10	$\frac{1,4}{3,69}$	$580 \div 590$	
27	15	То же . . . . .	1	15	$\frac{1,98}{5,22}$	620	
28	15	То же . . . . .	1	18	$\frac{1,98}{5,22}$	$630 \div 640$	
29	16	То же . . . . .	1	8*	$\frac{2,5}{6,56}$	до 680	* Через 15÷20 мин. произошло частичное обрушение штукатурки, что ускорило прогрев колонн
30	16	То же . . . . .	1	8*	$\frac{2,5}{6,56}$	640	
31	17	Колонна, составленная из двух швеллеров № 24 (полки стержня) и одного двутавра № 14 (стенка стержня); — общ. площадь сечения стержня $89,9 \text{ см}^2$ ; облицована в $\frac{1}{4}$ кирпича . . . . .	2	25	3,1	580	
32	17	То же . . . . .	3	00	3,1	585	

1	2	3	4	5	6	7	8
33	18	Колонна с облицовкой в $\frac{1}{4}$ кирпича со стержнем, составленным из двух швеллеров № 30 (полки стержня) одного двутавра № 18 (стенка стержня); общ. площадь стержня 130,6 см <sup>2</sup> .	2	45	3,1	580	
24	18	То же . . . . .	2	38	3,1	585	
35	19	Колонна, облицованная в $\frac{1}{4}$ кирпича, со стержнем составленным из двух двутавров № 27 (полки стержня) и одного двутавра № 18 (стенка стержня); общ. площадь стержня 150,6 см <sup>2</sup> .	2	40	1,85	490	
26	19	То же . . . . .	2	40	1,85	485	
37	20	Колонна, облицованная в $\frac{1}{4}$ кирпича, со стержнем, составленным из двух двутавров № 30 (полки стержня) и одного двутавра № 20 (стенка стержня); общ. площадь стержня 170 см <sup>2</sup> .	3	10	3,1	575	
38	20	То же . . . . .	3	00	3,1	580	



1	2	3	4	5	6	7	8
39	21	Колонна, облицованная в $\frac{1}{4}$ кирпича, со стержнем крестового сечения, составленным из четырех уголков № 15; общая площ. стержня 225 см <sup>2</sup> . . . . .	4	40	3,56	600	
40	21	То же . . . . .	4	00	3,56	600	
41	22	Колонна, облицованная в $\frac{1}{4}$ кирпича, со стержнем крестового сечения, составленным из четырех уголков № 20; общая площадь стержня 248 см <sup>2</sup> . . . . .	3	40	3,1	580	
42	22	То же . . . . .	3	50	3,1	585	
В с е г о . . . . .			42 опытных конструкции				

Примечание. Для колонн крестового сечения в графе 6 в числителе

$$\text{показаны } K_y; \text{ в знаменателе } K = \frac{\sigma_T}{\sigma}.$$

## 7. О влиянии заполнения на огнестойкость колонн

В Противопожарных нормах (Н 102—54) пределы огнестойкости стальных колонн даны при наличии заполнения между облицовкой и стальными стержнями негорюемыми материалами (шлакобетон, лёгкий бетон и др.). При этом в Нормах отмечается, что «при отсутствии заполнения внутреннего пространства колонн и балок (см. примечание 4 к приложению 1 Н 102—54) пределы огнестойкости уменьшаются на 25%».

Потребовалось проверить в какой мере данная рекомендация Норм подтверждается опытами. С этой целью были испытаны на огнестойкость колонны, имеющие различные формы поперечного сечения стальных стержней, дающие различную степень защиты последних негорюемым заполнением.

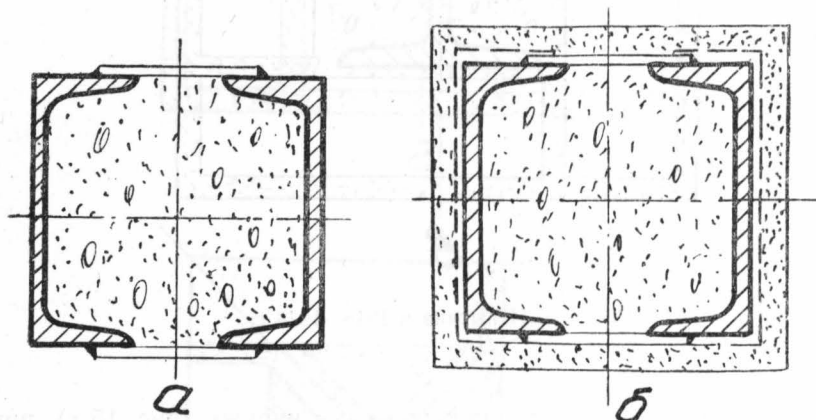


Рис. 15. Схемы поперечных сечений стальных колонн с заполнением  
а, б — испытаны на огнестойкость в 1953 году.

На рис. 15а, б, в, г и д представлены схемы поперечных сечений колонн с заполнением.

В таблице 4 приведены сравнительные данные о влиянии заполнения на пределы огнестойкости колонн. Из таблицы следует, что заполнение весьма существенно увеличивает этот важный показатель огнестойкости стальных конструкций.

Однако влияние заполнения на огнестойкость колонн даже при одинаковых способах их облицовки различно.

Особенно существенную роль в повышении предела огнестойкости (47%) сыграло заполнение в колоннах, испытанных в 1946—

1948 гг. (облицовка в  $\frac{1}{4}$  кирпича), где, как видно из рис. 15в, внутреннее пространство с двутавровым стержнем было полностью залито раствором бетона на кирпичном щебне. В колоннах, составленных

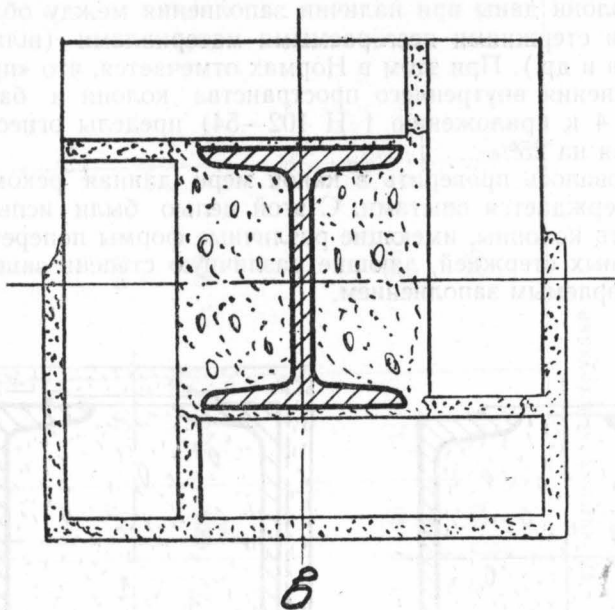


Рис. 15в. Испытана в 1946—1948 гг.

из 2 швеллеров с полками, направленными наружу (рис. 15 г), при облицовке в  $\frac{1}{4}$  кирпича заполнение дало приращение предела огнестойкости на 33%.

В колоннах крестового сечения (рис. 15 д), облицованных керамическими камнями — 25%, в колоннах из 2 швеллеров с полками, направленными внутрь, незащищенных (рис. 15 а) — 22%, в аналогичных колоннах, оштукатуренных по стальной сетке (рис. 15 б), примерно 30%.

Вполне очевидно, что с точки зрения использования защитных свойств заполнения, лучшим конструктивным решением стальных стержней колонн являются сечения, представленные на рис. 15 в, г, д. В этих случаях заполнение, находясь с наружной стороны стержней колонн (со стороны направления теплового потока), играло роль дополнительной облицовки.

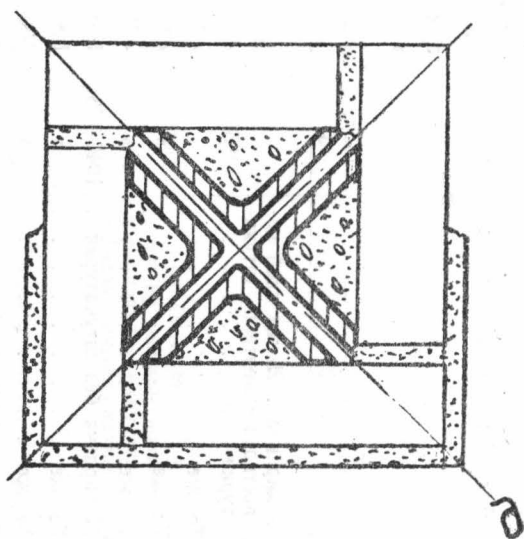
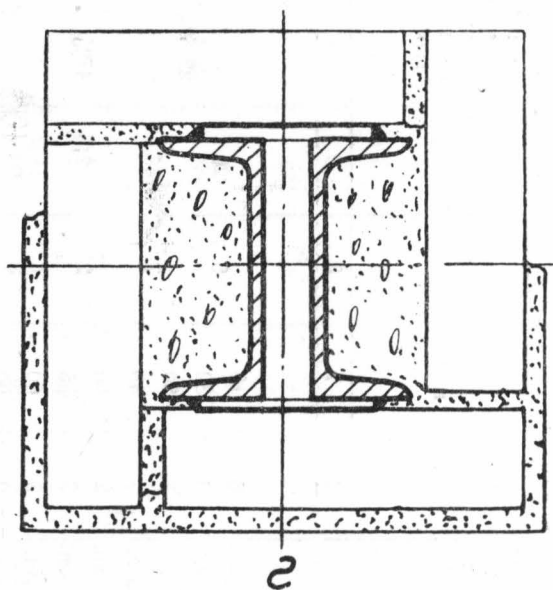


Рис. 15 г, д испытаны — в 1954 году.

Сравнительные данные о влиянии заполнения на пределы огнестойкости стальных колонн

№ п/п	Вид облицовки и толщина	Год испытания	Температура стального стержня в °С	Наличие запыления	Предел огнестойкости		Среднее значение предела огнестойкости		Увеличение предела огнестойкости заполнением
					час.	мин.	час.	мин.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	½ кирпича + 25 мм слой извести-цементной штукатурки	1954	475	б/зап.	6	10	6	20	22,5%
2	То же	»	475	б/зап.	6	30			
3	То же	»	475	с зап.	7	50	7	45	
4	То же	»	475	с зап.	7	40			
5	¼ кирпича без штукатурки	1946—48	500	б/зап.	2	00	2	2,5	47%
6	То же	»	500	б/зап.	2	5			
7	То же	»	500	с зап.	3	00	3	00	
8	То же	»	500	с зап.	3	00			
9	¼ кирпича + 25 мм слой извести-цементной штукатурки	1954	475	б/зап.	2	34	2	40	33%
	То же	»	475	б/зап.	2	45			

Продолжение табл. 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	1/4 кирпича + 25 мм слой из-вестково-цементной штукатурки . . . . .	1954	475	с зап.	3	25	3	32,5	
11	То же . . . . .	»	475	с зап.	3	40			
12	Керамические камни с четырь-мя каналами приведенной толщину стенок 54 мм + 25 мм слой штукатурки . . . . .	1953	500	б/зап.	4	00	3	58	25%
13	То же . . . . .	»	500	б/зап.	3	55			
14	То же . . . . .	»	500	с зап.	4	40	4	57	
15	То же . . . . .	»	500	с зап.	5	15			
16	Без облицовки . . . . .	1953	480	б/зап.	00	12,0	00	12,0	22%
17	То же . . . . .	»	475	с зап.	00	13	00	15,25	
18	То же . . . . .	»	475	с зап.	00	17,5			
19	Штукатурка с толщиной слоя 25 мм по сетке . . . . .	1953	475	б/зап.	00	45	00	46,2	
20	То же . . . . .	»	475	б/зап.	00	47,5			
21	То же . . . . .	»	475	с зап.	00	57,5	1	00	30%
22	То же . . . . .	»	475	с зап.	1	2,5			



Увеличение же предела огнестойкости на 22—30% в колоннах с расположением полок швеллеров внутрь (рис. 15 а, б, или в колоннах от № 16 до № 22 табл. 4), с точки зрения времени этого увеличения (всего от 3 до 14 мин.) практически ничтожно.

В данном случае оказывает решающее влияние на прогрев стержней колонн отсутствие их защиты или наличие 25 мм слоя штукатурки, который относительно быстро прогревается до высокой температуры.

Наличие не полностью заполненной воздушной прослойки в колоннах, испытанных в 1954 году (рис. 15 г), заметно отразилось на приращении предела огнестойкости этих колонн, которое оказалось ниже в сравнении с величиной приращения, полученной в других колоннах (рис. 15 в, д).

Краткий анализ представленных в таблице 4 данных свидетельствует о том, что эффективность заполнения связана, прежде всего, следующими основными факторами: формой и размерами поперечного сечения стальных стержней, определяющих толщину заполнения, расположением заполнения по отношению к стальным стержням колонн, а также величиной основного вида облицовки.

Отсюда следует, что для развитых площадей поперечных сечений стержней колонн (широкополочные двутавры, швеллеры, различные сочетания этих профилей и уголков) роль заполнения в увеличении предела огнестойкости конструкций будет в значительной мере возрастать.

Поскольку же в практике возможны самые разнообразные конструктивные решения стальных стержней и в связи с этим — различная степень их защиты заполнением, то принятое Н 102—54 увеличение предела огнестойкости колонн с заполнением на 25% следует считать приближенным и справедливым лишь для какого-то частного случая облицовки колонн.

Более точное определение пределов огнестойкости колонн с заполнением возможно расчетным путем, при этом теплотехническая характеристика (а) раствора заполнения может быть принята так же, как и для штукатурного раствора.

Покажем это хотя бы на одном примере.

Стальная колонна облицована в  $\frac{1}{2}$  кирпича и защищена 25 мм слоем известково-цементной штукатурки.

Коэффициент запаса конструкции  $K=1,74$ .

Расчет предела огнестойкости такой колонны без заполнения приведен в примере 2 п. 7;

Согласно расчету  $\tau = 6$  час. 5 мин.

Влияние заполнения (шлакобетон) получим, применив формулу (10).

Расчетный коэффициент температуропроводности «а» заполнения принимаем как и для штукатурки

$$(\text{при } t = 475^\circ, a = 0,218 \text{ см}^2/\text{мин}).$$

При этом делаем допущение, что заполнение расположено по периметру стального стержня колонны приведенным слоем толщиной  $\delta_{\text{ср}} = 4,5 \text{ см}$ .

$$(\delta_{\text{ср}} = \frac{90 + 90}{4} = 45 \text{ мм} = 4,5 \text{ см}).$$

Подставив в формулу (10) исходные данные, получим:

$$\begin{aligned} \tau &= -66 \left( 1 + \frac{3,53}{1,74} \right) + \\ &+ \sqrt{\left[ 66 \left( 1 + \frac{3,53}{1,74} \right) \right]^2 + \frac{812 \left( 1 - 0,571 \frac{1}{1,74} \right) 20,2}{0,218}} = \\ &= -199 + \sqrt{39\,600 + 50\,500} = 103 \text{ мин. или } 1 \text{ час. } 43 \text{ мин.} \end{aligned}$$

Отсюда полный предел огнестойкости колонны с заполнением будет равен:

$$\tau = 6 \text{ час. } 5 \text{ мин.} + 1 \text{ час. } 43 \text{ мин.} = 7 \text{ час. } 48 \text{ мин.}$$

По опытным данным (см. таблицу 4) пределы огнестойкости таких колонн составили:

$$\tau_1 = 7 \text{ час. } 40 \text{ мин.} \quad (\text{№ } 3 \text{ в табл. } 3);$$

$$\tau = 7 \text{ час. } 50 \text{ мин.} \quad (\text{№ } 2 \text{ в табл. } 3).$$

При выбранных нами некоторых формах сечения стальных стержней колонн, заполнение свободного пространства между облицовкой и стержнями дало приращение пределов огнестойкости этих конструкций от 22% до 47% в сравнении с аналогичными колоннами, не имеющими заполнения.

Поскольку величина этого приращения в основном зависит от толщины заполнения, определяемого формой поперечного сечения стержней колонн, то в действительности указанные приращения, ввиду многообразия конструктивных решений стержней, могут быть самыми различными.

В связи с тем, что в известных случаях заполнение весьма существенно увеличивает пределы огнестойкости колонн и, следовательно, может являться серьезным фактором в вопросах экономии стоимости облицовочных работ, представляется целесообразным при определении пределов огнестойкости колонн роль заполнения учитывать

расчетом. Это относится прежде всего к колоннам, имеющим стальные стержни со сплошной стенкой крестового сечения, двутавровые обычные, двутавровые широкополочные, составленные в форме двутавров из различных прокатных профилей (см. рис. 15 в, г, д) и не распространяется на замкнутые сечения колонн (см. рис. 15 а, б).

#### 8. Влияние на величину предела огнестойкости колонн площади поперечного сечения стальных стержней

Стальные стержни большей части колонн, испытанных на огнестойкость, ограничивались сравнительно легкими сечениями, поэтому расчетные формулы, приведенные в п. 4 данной работы являются справедливыми лишь для этих колонн.

Для колонн, имеющих более развитые сечения стальных стержней, формулы (10) и (11) дают заниженные результаты пределов огнестойкости, так как ими не учитывается влияние на прогрев колонн массы металла.

В Противопожарных нормах Н 102—54, а также в некоторых иностранных источниках приводятся данные о пределах огнестойкости стальных незащищенных колонн в зависимости от площади сечения металла. Однако для стальных облицованных колонн нет данных, отражающих влияние этого фактора на величину пределов огнестойкости.

Для выяснения этого вопроса были испытаны на огнестойкость колонны с площадью поперечного сечения металла 90, 130, 150, 170, 225 и 248 см<sup>2</sup>. Коэффициент запаса большинства из этих колонн был принят равным 3,1<sup>\*</sup>), облицовка их — 1/4 кирпича.

В сравнении с колоннами, имеющими легкие стальные стержни, прогрев тяжелых колонн отличался значительным перепадом температуры между стержнем и внутренней поверхностью облицовки.

Наглядной иллюстрацией этого явления служит характер кривой 2 из рис. 16, характеризующего прогрев облицовки и стержня колонны с площадью сечения  $F=248$  см<sup>2</sup>.

Наличие такого перепада температуры между облицовкой и стержнем колонны объясняется теплоемкостью большой массы металла, заключенной в стержне колонны. Поэтому прогрев стержня значительно отстает от прогрева внутренней поверхности кирпича, обращенной к стержню, что в целом увеличивает время, при котором достигается критическая температура элемента.

---

<sup>\*</sup>) При выбранных площадях сечения стержней колонн возможность снижения коэффициента запаса «К» лимитировалась мощностью пресса (200 т) испытательной установки.

В результате анализа опытных данных, была получена следующая формула, учитывающая приращение ( $\Delta\tau$ ) предела огнестой-

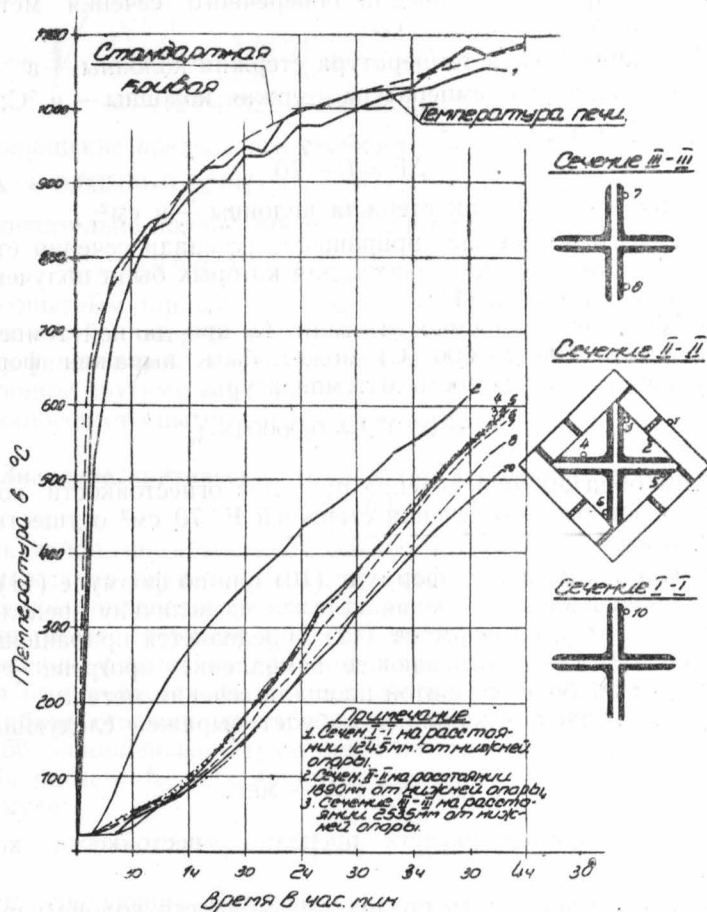


Рис. 16. График изменения температуры в колонне с площадью сечения металла 248 см<sup>2</sup>.

кости колонн, имеющих площади сечения металла, отличные от испытанных ранее (в среднем 70 ÷ 75 см<sup>2</sup>):

$$\Delta\tau = 0.00508 \cdot C_t \cdot \Delta F (t_K - t_H) \quad (12)$$

где:  $C_t$  — коэффициент теплоемкости стали при данной температуре ккал/кг $^{\circ}$ С;

$\Delta F$  — приращение площади поперечного сечения металла — в см $^2$ ;

$t_k$  — критическая температура стержня колонны — в  $^{\circ}$ С;

$t_n$  — начальная температура стержня колонны — в  $^{\circ}$ С;

В формуле (12)

$$\Delta F = F - 70,$$

где:  $F$  — площадь сечения стержня колонны — в см $^2$ ;

разность  $F - 70$  показывает приращение площади сечения стержня, в сравнении с легкими колоннами, для которых были получены расчетные формулы (10) и (11).

Коэффициент теплоемкости стали  $C_t$  при данной температуре (в пределах от 100 до 600 $^{\circ}$  С) может быть выражен формулой, обобщающей его зависимость от температуры:

$$C_t = 0,1072 + 0,000048 \cdot t_k \quad (13)$$

Таким образом, определение пределов огнестойкости колонн с площадью поперечного сечения стержней  $F > 70$  см $^2$  осуществляется в два приема:

сначала находим  $\tau$  по формуле (10) или по формуле (11) — без учета влияния площади сечения металла на величину предела огнестойкости, а затем по формуле (12) определяется приращение предела огнестойкости, учитывающее замедление прогрева стержня колонны за счет более развитой площади сечения металла.

Полный предел огнестойкости будет выражен следующим равенством:

$$\tau_{\text{полн}} = \tau + \Delta\tau - \text{мин.}$$

Приведем пример расчета предела огнестойкости колонны с  $F > 70$  см $^2$ .

**Пример 1.** Определить предел огнестойкости колонны при следующих данных:

$F = 150$  см $^2$ ,  $K = 1,85$ ;  $\delta = 1/4$  кирпича,  $a = 0,350$  см $^2$ /мин.;

при  $K = 1,85$

$$t_k = 490^{\circ},$$

тогда

$$C_t = 0,1072 + 0,000048 \cdot 470 = 0,1307 \text{ ккал/кг } ^{\circ}\text{С и}$$

$$\tau = -66 \left( 1 + \frac{3,53}{1,85} \right) + \sqrt{\left[ 66 \left( 1 + \frac{3,53}{1,85} \right) \right]^2 + \frac{812 \left( 1 - 0,571 \frac{1}{1,85} \right) 42,2}{0,350}} = -192 + 322 = 130 \text{ мин.} = 2 \text{ час. } 10 \text{ мин.}$$

Приращение предела огнестойкости составит:

$$\Delta\tau = 0,00508 \cdot 0,1298 (150 - 70)(490 - 20) = 23,8 \approx 24 \text{ мин.}$$

Окончательно полный предел огнестойкости:

$$\tau_{\text{полн}} = 2 \text{ час. } 10 \text{ мин.} + 24 \text{ мин.} = 2 \text{ час. } 34 \text{ мин.}$$

По опытным данным (см. таблицу 3) предел огнестойкости этой колонны получен равным 2 час. 40 мин.

При аналогичном способе расчета пределов огнестойкости стальных колонн с другими значениями «F» и «K» были получены данные, отличающиеся от опытных не более чем на  $\pm 10\%$ .

### 9. Значение критических температур в колоннах с гибкими стержнями

Для колонн с гибкостью стальных стержней  $\lambda < 100$  выявлена связь между их пределом огнестойкости и величиной критической температуры, определяемой коэффициентом запаса конструкции.

Для гибких стержней с  $\lambda > 100$  требовалось хотя бы в первом приближении установить причины, определяющие наступление их предела огнестойкости. С этой целью были испытаны на огнестойкость гибкие стержни крестового сечения ( $\lambda \cong 123$ ) при  $K=3,69$ ; 5,22; 6,56, защищенные штукатуркой по стальной сетке.

При расчете  $t_K$  для принятых значений коэффициента запаса по формуле:

$$t_K = 700 \left( 1 - \frac{1}{1,75 K} \right)$$

получены следующие значения критической температуры:

для $K=3,69$	—	$t_K=590^\circ\text{C};$
для $K=5,22$	—	$t_K=620^\circ\text{C};$
для $K=6,56$	—	$t_K=640^\circ\text{C}.$

Пределы огнестойкости при испытании этих колонн были получены:

при $K=3,69$	— 70 мин.;
при $K=5,22$	— 75 мин. и 78 мин.;
при $K=6,56$	— 68 мин. в 2 случаях.



Указанные выше данные о пределах огнестойкости гибких колонн, имеющих высокие значения  $K$ , свидетельствуют о том, что при малых площадях поперечного сечения металла стержней и сравнительно тонких слоях облицовок (в данном случае 25 мм слой штукатурки) значительное увеличение « $K$ » (от 3,69 до 6,56) мало влияет на рост предела огнестойкости. Хотя в целом при этих коэффициентах запаса критическая температура стали стержней и достигает 580—640° С, вместе с этим большая скорость прогрева тонкой облицовки и легких стальных стержней колонн в данном случае снижает роль коэффициентов запаса в увеличении пределов огнестойкости таких конструкций.

При больших же толщинах облицовки колонн, когда их прогрев происходит более медленно, влияние коэффициента запаса на величину предела огнестойкости конструкции существенно возрастает.

Анализ температур стальных стержней колонн, при которых были отмечены их пределы огнестойкости, показал, что в колонне, имеющей  $K=3,69$ , величина критической температуры составляла 580—590° С; в колоннах с  $K=5,22$  — в одном случае 630÷640° С; — в другом — 620° С; в колоннах с  $K=6,56$  — в одном случае максимальная до 680° С \*), — в другом — 640° С.

Общий характер деформаций этих колонн после испытания на огнестойкость представлен на рис. 17 (большая часть штукатурки колонн удалена после их испытания).

Из приведенных данных видно, что значения критических температур, полученные расчетом и зафиксированные опытным путем к моменту наступления пределов огнестойкости этих колонн, достаточно близки между собой, а в отдельных случаях (где штукатурка не имела разрушений в процессе испытаний) полностью совпадают.

Как известно, при нормальной температуре потеря устойчивости гибких сжатых стальных стержней обычно определяет и потерю их несущей способности. В этом отношении значительный интерес представляет вопрос о том, в какой мере указанное положение сохраняется для гибких сжатых стержней, нагретых до высоких температур.

С этой целью определим снижение от температуры предела текучести стали  $\sigma_T$  испытанных стержней колонн и сравним полученные значения  $\sigma_T$  при критических температурах  $t_K$  с рабочими напряжениями  $\sigma_y$  каждой группы стержней.

Для стержней, имеющих  $K=3,69$  и  $\sigma_y=977$  кг/см<sup>2</sup>, к моменту наступления их предел огнестойкости величина  $t_K$  составляла примерно 590°.

\*) В этой колонне, вследствие обрушения штукатурки, на различных уровнях по длине были отмечены значения температуры стержня до 680° С; на участках стержня, где штукатурка сохранилась 520—530° С.

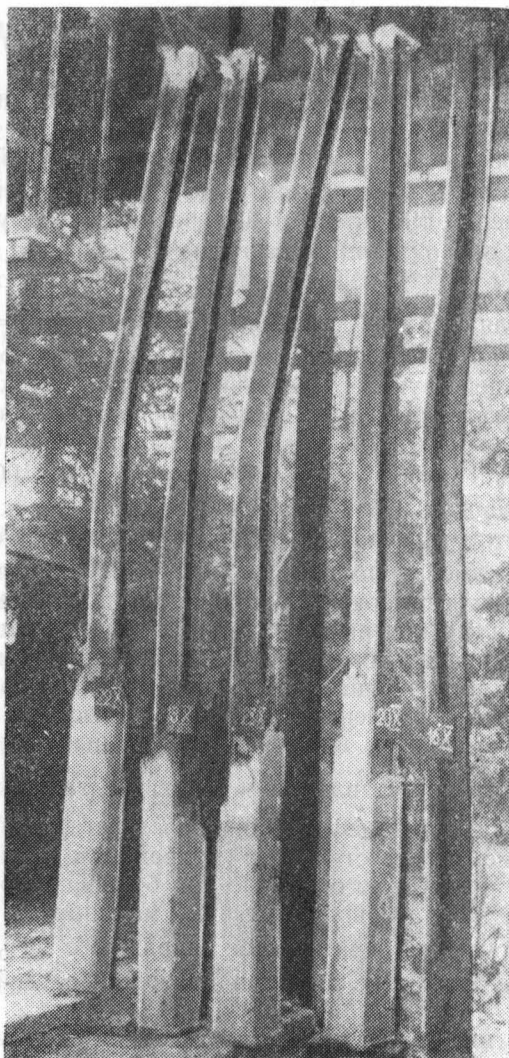


Рис. 17. Характер деформации стержней легких колонн с гибкостью  $\lambda > 100$ .

Следовательно, предел текучести стали этих стержней при  $t_k = 590^\circ$  мог составлять в среднем —

$$\sigma_T^t = \sigma_T \cdot \left( \frac{700 - t_k}{400} \right) = 3600 \left( \frac{700 - 590}{400} \right) = 990 \text{ кг/см}^2,$$

т. е. фактически снизился до величины рабочего напряжения от нагрузки.

Аналогичный расчет для другой группы стержней при  $K=5,22$  показывает, что  $\sigma_T^t$  стали к моменту нагрева стержней до  $t_k = 620^\circ$  составлял примерно  $690 \text{ кг/см}^2$  и был равен рабочему напряжению

$$\sigma_y = \frac{P}{F} = \frac{23900}{34,6} = 690 \text{ кг/см}^2$$

(см. табл. 1). Для стержней, имеющих  $K=6,56$ , при  $t_k = 640^\circ$  величина  $\sigma_T^t$  составляла  $540 \text{ кг/см}^2$ , что также практически совпадает с напряжением от действующей нагрузки, равным  $548 \text{ кг/см}^2$ .

Таким образом, опытными данными подтверждается возможность применения формулы (4) не только для расчета величины критической температуры стальных стержней с  $\lambda < 100$ , но и стержней с  $\lambda > 100$ .

С другой стороны, указанные данные позволяют считать, что и для гибких стержней колонн, имеющих  $\lambda > 100$ , решающим фактором, определяющим потерю их устойчивости и несущей способности (потерю прочности) при высоких температурах, а следовательно, и наступление их предела огнестойкости, является снижение предела текучести стали до величины напряжений от действующей нагрузки.

Более полное объяснение работы при высоких температурах гибких сжатых стержней, например, с помощью формулы Эйлера

$\sigma_{кр} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$ , не представляется возможным, так как в этом случае был бы необходим учет деформации ползучести стали от температуры и внесение соответствующей поправки в величину модуля упругости  $E_t$ , получаемого обычно при больших скоростях деформаций стали на лабораторных разрывных машинах.

При этом, очевидно, критическое напряжение  $\sigma_{кр}^k$  может быть меньше или не больше величины напряжения от действующей нагрузки.

Вместе с этим, общая удовлетворительная сходимость опытных и расчетных значений  $t_k$  при соответствующих им коэффициентах запаса позволяет для практических расчетов предела огнестойкости гибких стальных колонн пользоваться формулой (10). Как известно, эта формула выведена из условия, что потеря устойчивости и несущей

щей способности сжатых стержней колонн при высоких температурах, имеющих место на пожарах, происходит в результате снижения  $\sigma_T^t$  до величины  $\sigma$ .

## 10. Влияние на величину предела огнестойкости колонн их основных конструктивных параметров

Из расчетных формул (10), (11) и (12) видно, что величина предела огнестойкости колонн зависит от коэффициента запаса конструкции  $K$ , толщины материала облицовки  $\delta$ , вида облицовки, характеризующегося расчетным коэффициентом температуропроводности  $a$  и площади поперечного сечения металла  $F$ .

При этом, кроме коэффициента температуропроводности, увеличение каждого из других параметров вызывает и увеличение предела огнестойкости колонн.

В какой мере каждый из этих параметров влияет на величину предела огнестойкости стальных колонн покажем на следующем примере.

Возьмем, например, колонну со следующими показателями: облицовка —  $1/4$  кирпича, коэффициент запаса  $K=1,6$ , площадь сечения металла стержня  $F=70 \text{ см}^2$ .

Для определения предела огнестойкости колонны, воспользуемся формулой (10) или формулой (11).

При  $K=1,6$  критическая температура  $t_k=450^\circ \text{ C}$ , тогда  $a=0,340 \text{ см}^2/\text{мин}$ .

Подставляя в формулу (11) исходные данные, получим величину предела огнестойкости  $\tau = 2 \text{ часа } 06 \text{ мин}$ .

Сохраняя другие параметры колонны, увеличим коэффициент запаса до 2.

В этом случае величина критической температуры будет составлять  $500^\circ \text{ C}$ , расчетный коэффициент температуропроводности (см. табл. 2)  $a=0,378 \text{ см}^2/\text{мин}$ .

Расчет по формуле (11) показывает, что при увеличении коэффициента запаса колонны до 2 предел огнестойкости ее составит  $\tau = 2 \text{ час. } 11 \text{ мин}$ . То есть при незначительном увеличении коэффициента запаса предел огнестойкости во втором случае несколько возрос.

Если коэффициент запаса увеличить в два раза, т. е. принять  $K=3,2$ , тогда  $\tau = 2 \text{ часа } 33 \text{ мин}$ .

Наконец, увеличим площадь сечения стального стержня колонн в два раза, оставляя другие ее параметры прежними, т. е.  $K=1,6$  и  $\delta = 1/4$  кирпича.

В этом случае необходимо определить приращение предела огнестойкости колонны за счет увеличения площади сечения стержня до 140 см<sup>2</sup>.

Расчет производим по формуле (12):

$$\Delta\tau = 0,00508 \cdot C_t \Delta F (t_k - t_n).$$

Принимаем  $t_n = 20^\circ \text{C}$ .

Для  $K=1,6$  критическая температура  $t_k = 450^\circ$ . Тогда коэффициент теплоемкости стали получим из формулы:

$$C_t = 0,1072 + 0,000048 \cdot t_k,$$

откуда;

$$C_t = 0,1072 + 0,000048 \cdot 450 = 0,1288 \text{ ккал./кг. } ^\circ\text{C}.$$

Подставляя исходные данные в формулу (12), будем иметь:

$$\Delta\tau = 0,00508 \cdot 0,1288 (140 - 70) (450 - 20) = 19,7 \approx 20 \text{ мин.}$$

Следовательно, предел огнестойкости колонны при  $K=1,6$  и  $F=140 \text{ см}^2$  будет равен 2 часа 26 мин.

Если бы колонна имела  $K=3,2$ , то предел огнестойкости ее при  $F=140 \text{ см}^2$  и  $\delta=1/4$  кирпича был бы равен:

$$2 \text{ часа } 33 \text{ мин.} + 20 \text{ мин.} \approx 3 \text{ час.}$$

В Н 102—54 приведены данные о пределах огнестойкости незащищенных колонн с площадью сечения металла от 100 до 400 см<sup>2</sup>. Если бы Н 102—54 учитывалось влияние на величину предела огнестойкости площади сечения металла, то, например, колонна, облицованная в  $1/4$  кирпича при  $F=300 \text{ см}^2$  и  $K=1,6$  имела бы предел огнестойкости не 2 часа, а 2 час. 06 мин. + 62 мин. = 3 часа 8 мин., т. е. в  $\frac{188}{120} = 1,6$  раза больше.

Наличие же слоя штукатурки в 25 мм могло бы увеличить предел огнестойкости колонны примерно до 4 часов, а с учетом заполнения, величина предела огнестойкости такой колонны составляла бы не менее 5 час. Расчеты, а также опытные данные, показывают, что при одном и том же виде и толщине облицовки колонны ее предел огнестойкости может быть существенно увеличен путем изменения некоторых параметров конструкции в зависимости от того, какой параметр в том или ином конкретном случае представляется целесообразным и выгодным изменить.

Указанные примеры свидетельствуют также о том, что учет площади сечения металла, а в необходимых случаях и коэффициента запаса, является серьезным резервом повышения пределов огнестойкости колонн.

Отсутствие в Н 102—54 и в СН и П данных о расчете пределов огнестойкости стальных колонн в ряде случаев приводит к неверной оценке их огнестойкости, вызывает излишнюю затрату материалов на облицовку колонн и увеличивает стоимость этих работ.

## 11. Оценка некоторых методов облицовки стальных колонн

1. Наступление предела огнестойкости колонн, оштукатуренных по стальной сетке, определялось следующими основными факторами: прогревом штукатурки и снижением ее прочности, усадкой, вызывающей появление трещин, расслоением, и наконец, обрушением штукатурки на отдельных участках боковых граней колонн.

На скорость прогрева штукатурки влияет прежде всего толщина ее слоя. Если при  $20 \div 25$  мм слое штукатурки предел огнестойкости колонн с  $F=70 \div 75$  см<sup>2</sup> составлял  $0,75 \div 1,0$  час, то при аналогичной площади поперечного сечения стержня колонны, но толщине штукатурки в 50 мм предел огнестойкости возрастал до  $1,75 \div 2$  час.

Однако, по всей вероятности, на величину предела огнестойкости таких колонн влияет и вид штукатурки. Так, согласно данным иностранной литературы, прогрев гипсовой штукатурки равного слоя в сравнении с цементно-известково-песчаной штукатуркой происходит в 2,5 раза медленнее.

Появление трещин и обрушение штукатурки, ускоряющее прогрев колонн до критической температуры, было вызвано не только усадкой и снижением прочности раствора штукатурки при воздействии высокой температуры, но и деформацией стальных вертикальных прутьев ( $8 \div 10$  мм), приваренных по углам стержней колонн, с целью фиксации сетки \*) на определенном расстоянии от полок и стенок элементов стержней (в данном случае полки и стенок швеллеров в сквозных колоннах).

Обычно в результате искривлений этих прутьев, на некоторых участках по углам колонн (см. рис. 5) происходило скалывание штукатурки, ее обрушение и, как следствие, местный прогрев обнаженных участков стержней колонн. Основная же часть штукатурки на боковых участках колонн сохранялась до конца испытания, чему способствовало надежное армирование штукатурки стальной сеткой.

Из сказанного следует, что эффективность штукатурки может быть в значительной мере повышена созданием условий, обеспечивающих свободное удлинение при нагреве стальных прутьев, фиксирующих сетку на определенном расстоянии от боковых поверхностей стержней колонн.

\*) Этим мероприятием осуществлялось армирование штукатурки сеткой, что должно было улучшить ее устойчивость против обрушений при нагреве.



Указанное мероприятие обеспечивается, например, путем свободного закрепления прутьев вязальной проволокой в двух-трех участках по длине стержня колонны.

Расслоение штукатурки, приводящее к ее обрушению, является результатом обычных методов производства штукатурных работ. Как правило, происходит расслоение и обрушение основного слоя штукатурки («грунта» или «намета»), наносимого значительное время спустя после окончания схватывания и начального отвердевания первого подготовительного слоя («обрызга» или «набрызга»).

Следовательно, чтобы предупредить это явление, или во всяком случае уменьшить вероятность обрушения штукатурки в результате ее расслоения от температуры, необходимо толщину первого подготовительного слоя штукатурки принимать возможно большей.

Это, конечно, потребует применения штукатурных растворов с повышенной активностью схватывания и твердения.

Необходимо стремиться к тому, чтобы основной слой раствора штукатурки, так же как и частично первый слой, был армирован сеткой; это усилит связь между обоими слоями штукатурки и предупредит возможность ее обрушения при нагреве.

В данном случае имеются ввиду обычные составы штукатурных растворов, так как чрезмерное отощение их, а в равной степени и применение слишком жирных растворов будут отрицательно влиять на эффективность штукатурки и в значительной мере снизят роль указанных выше рекомендаций.

Характер поведения при испытании штукатурки, непосредственно наносимой на поверхность кирпичной кладки, керамических камней или различных облицовочных плит, определяется состоянием основания облицовочных материалов, а также надежностью способов, используемых в качестве подготовки основания для нанесения раствора штукатурки.

При кирпичной облицовке наиболее принятым считается оставление достаточно глубоких пустошвов. Как показали испытания таких колонн на огнестойкость, надежность этого способа нанесения штукатурки, с точки зрения ее сохранности в условиях пожара, определяется двумя основными моментами — составом раствора штукатурки и толщиной первого подготовительного слоя штукатурки.

Тощие сложные или обычные штукатурные растворы при нагреве резко снижают прочность штукатурки, последняя становится рыхлой. Обрушение такой штукатурки отмечалось через 5—10 мин. от начала испытания колонн на огнестойкость.

В том же случае, если раствор штукатурки подобран нормального состава, но толщина слоя «обрызга» была незначительней, при

нагреве происходило обрушение второго, наружного слоя штукатурки, что снижало огнестойкость колонн.

Из сказанного вытекает необходимость организации надежного контроля при подборе штукатурных растворов и производстве штукатурных работ.

Следует также рекомендовать по возможности увеличивать толщину первого слоя штукатурки, наносимого непосредственно на основание облицовки, металлическую сетку или проволоку. При использовании в качестве облицовочных изделий в стальных колоннах гипсовых и других плит, а также керамических камней надежным средством, обеспечивающим сохранность штукатурки при пожаре, является армирование ее мягкой проволокой ( $1,8 \div 2,0$  мм), которая перед нанесением раствора штукатурки спирально наматывается на грани облицованных колонн с шагом в среднем от 50 до 70 мм.

Опыты показали, что обрушение штукатурки в этих случаях происходило лишь в результате перегорания проволоки, вызванного длительным испытанием колонн на огнестойкость. Но этим не исчерпывается положительная роль проволоки. При тонких (от 40 до 80 мм), неустойчивых на большой длине колонн облицовках, проволока также будет длительное время предохранять облицовки от обрушений в условиях пожара.

2. Наиболее эффективной оказалась облицовка стальных стержней колонн кирпичем и керамическими камнями. Вместе с этим облицовка в  $\frac{1}{4}$  кирпича, а равно и облицовка керамическими камнями толщиной в среднем до 90 мм, требуют определенных мер, препятствующих их обрушению при воздействии на них высокой температуры.

Испытания колонн на огнестойкость показали, что одной из радикальных мер, полностью обеспечивающих сохранность облицовки в  $\frac{1}{4}$  кирпича на месте до наступления предела огнестойкости конструкции, является укладка в горизонтальные швы (через 1—2 ряда) стальных хомутов из проволоки  $\varnothing 3,5 \div 4$  мм.

Аналогичной мерой для облицовки из керамических камней служат полосы стальной сетки, которые укладывались в горизонтальные швы кладки.

3. Как следует из результатов испытания стальных колонн, облицованных 60 мм гипсовыми плитами, при данном виде облицовки пределы огнестойкости колонн были получены от 4 до 5 и более часов.

В сравнении, например, с колоннами, облицованными в  $\frac{1}{4}$  кирпича (65 мм), некоторые колонны с гипсовой облицовкой (60 мм) имели предел огнестойкости в два раза выше. Вместе с этим наступ-

ление предела огнестойкости колонн с гипсовой облицовкой во всех случаях было вызвано преждевременным обрушением одной или нескольких гипсовых плит. Ни одно из мероприятий (крепление плит посредством специальных петель к стальным стержням колонн, укладка в горизонтальные швы стальных хомутов, обвязка плит стальной проволокой и др.), осуществляемых с целью предупреждения обрушений гипсовых плит при испытании колонн на огнестойкость, не дало ожидаемых результатов.

Обрушение гипсовых плит происходило задолго до того, как температура участков стальных стержней, достигала 100° или выше.

Значительная усадка гипсовых плит при их прокаливании, обусловленная испарением влаги в плитах и диссоциацией гипса, приводила к искривлению плит, образованию в них сети мелких и крупных трещин, раскрытию вертикальных и горизонтальных швов.

Все эти явления вызывали обрушение плит и быстрое повышение температуры обнаженных участков стержней колонн вплоть до потери их несущей способности.

Как показали результаты испытания на огнестойкость перегородок\*), при отощении гипса (или алебаstra) мелким шлаком, создающим жесткий скелет, такой усадки гипса не происходило; не было также отмечено и значительных разрушений гипсовых плит.

Аналогичные данные были получены Чикагской лабораторией в 1953 году при повторной попытке\*\*) испытания шести стальных колонн, облицованных покрытием в виде древесно-волокнуистого бетона и гипсовыми плитами с включением 3% древесной стружки.

Таким образом, причина обрушения гипсовых плит при испытании колонн на огнестойкость заключается не в недостатках конструктивных мер, используемых при облицовке этих колонн, а в физико-химических процессах, происходящих в гипсе при его нагревании до высоких температур и проявляющихся значительной усадкой плит и потерей их прочности.

Применение в качестве облицовочных изделий гипсовых плит, армированных волокнистыми материалами, а также гипсошлаковых плит, в значительной мере улучшит сопротивляемость воздействию температуры этого высоко-эффективного термоизолирующего материала и намного улучшит огнестойкость стальных колонн, облицованных этими плитами.

\*) Испытания проведены в ЦНИИПО инженером В. П. Бушевым.

\*\*) Первые испытания колонн облицованных гипсовыми плитами, проведенные в более раннее время, не дали положительных результатов вследствие обрушений гипсовой облицовки при воздействии высокой температуры.

## VII. Сравнение полученных результатов с данными об огнестойкости колонн, опубликованными в иностранной литературе

Известный интерес представляет сравнение полученных результатов работы по огнестойкости стальных колонн с данными в этом направлении, полученными за границей.

Испытания стальных колонн на огнестойкость проводились в 1917—1933 годах Бюро Стандартов США с Объединенными Компаниями заводских Обществ Страхования от огня и Национальным Бюро Объединения Лабораторий Страховых Обществ в Чикаго.

Было испытано под нагрузкой более 100 колонн с различными видами защиты их стальных стержней (пустотелыми керамическими камнями, кирпичом, гипсом, штукатуркой по стальной сетке и т. д.), проводились также испытания стальных и чугунных незащищенных колонн.

Методика испытаний колонн Бюро Стандартов США в основном аналогична отмеченной в разд. III, поэтому описание ее не вызывает необходимости.

На некоторых принципиальных положениях этой методики остановимся ниже в связи с анализом данных о пределах огнестойкости некоторых колонн, испытанных Бюро Стандартов.

Если в ранних изданиях своих работ Бюро Стандартов США ограничивалось лишь описанием опытной установки, методики испытаний и фактических результатов с анализом температур конструкций и их деформаций, то в более поздних (хотя, видимо, и не последних) работах, например, в Сообщении BMS 92 («Классификация строительных конструкций по степени их огнестойкости» — сообщение подкомиссии по вопросам огнестойкости Центральной Комиссии по жилищному строительству, проектированию и исследованию, 1942) уже даются сведения о методах расчета пределов огнестойкости колонн.

Так, в частности, для определения предела огнестойкости металлических колонн рекомендуется формула:

$$P = c \left[ \left( \frac{D^2 - d^2}{D} \right) + (1 - b) \frac{d^2}{D} \right]^n$$

или

$$P = c \left( D - b \frac{d^2}{D} \right)^n,$$

где: «b» и «c» — константы;

D и d — размер или диаметр соответственно наружной и внутренней частей колонн;

n — постоянный показатель степени;

P — «период» огнестойкости колонны.

Другие константы указанной формулы предлагается вычислять решением одной или более пар уравнений, что предполагает необходимость испытания на огнестойкость двух (или более) однотипных колонн, но с разными поперечными сечениями.

Приведенная формула является чисто эмпирической, она не раскрывает физической сущности явлений, связанных с наступлением предела огнестойкости и конструктивных параметров элемента, влияющих на его огнестойкость.

Более того, для определения пределов огнестойкости по указанной формуле других колонн, предлагается получение констант «b» и «с» путем огневого испытания дополнительных конструкций из одного и того же материала, но с разными поперечными сечениями.

Естественно, что такой метод расчета пределов огнестойкости колонн является неприемлемым для широкого практического применения.

Не останавливаясь более на уровне совершенства метода расчета пределов огнестойкости стальных колонн, предлагаемого в указанном Сообщении, проанализируем некоторые данные испытаний, полученные лабораториями Чикаго.

Сведем в отдельную таблицу (см. табл. 5) результаты испытаний на огнестойкость небольшой части стальных колонн, полученные Чикагской лабораторией и определим расчетом по формуле (10) пределы огнестойкости этих колонн. Так, например, предел огнестойкости колонны, обозначенной в табл. 5 № 23, получен равным 2 час. 52 мин.

Для этой колонны:  $\sigma_T = 2500 \text{ кг/см}^2$ ,  $\sigma = 640 \text{ кг/см}^2$ , тогда  $K = \frac{2500}{640} = 3,90$ ; облицовка — слой штукатурки, равный 51 мм. При  $K = 3,9$  значение  $t_k = 590^\circ$  и  $a = 0,270 \text{ см}^2/\text{мин}$ .

Подставляя исходные данные в формулу (10) получим:

$$\begin{aligned} \tau &= -66 \left( 1 + \frac{3,53}{3,9} \right) + \\ &+ \sqrt{\left[ 66 \left( 1 + \frac{3,53}{3,9} \right) \right]^2 + \frac{812 \left( 1 - \frac{1}{1,75 \cdot 3,9} \right) 26}{0,270}} = \\ &= -125,8 + 287 = 161 \text{ мин.} \cong 2 \text{ час. } 40 \text{ мин.} \end{aligned}$$

Согласно графику, представленному на рис. 18, для этой колонны, критическая температура стержня в  $590^\circ \text{ С}$  отмечена примерно к 2 час. 40 мин. и лишь в одной точке (точка 4) температура к этому времени достигала  $635 \div 640^\circ \text{ С}$ .

Таблица 5

# Результаты огневых испытаний стальных колонн по зарубежным данным

№№ образца	Краткое описание конструкций	Рабочая нагрузка ТН	Напряжение от рабочей нагрузки $\sigma$ кг/см <sup>2</sup>	Предел текучести стали колонн $\sigma_T$ кг/см <sup>2</sup>	$K = \frac{\sigma_T}{\sigma}$	Пределы огнестойкости и периоды удлинения		Средняя $t^\circ$ стержней колонн в $^\circ\text{C}$
						час.	мин.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
23	Широкополочный двутавр $F=83,8$ см <sup>2</sup> штукатурка в два слоя по 25,4 мм . . . . .	53,5	640	2500	3,90	$\frac{2-52}{2-30}$		635
24	Два швеллера полками наружу $F=56,5$ см <sup>2</sup> ; штукатурка с возд. прослойкой в два слоя по 22,5 каждый . . . . .	50,0	885	2970	3,35	$\frac{2-25}{2-00}$		580
25	Два швеллера полками наружу, соединенные полосой, образующей стенку; $F=50$ см <sup>2</sup> штукатурка 25,4 мм . . . . .	47,8	956	2320	2,42	$\frac{1-07}{0-57}$		630
26	Сквозная колонна из четырех уголков $F=54,5$ см <sup>2</sup> ; слой штукатурки в 28,8 мм по металлич. сетке . . . . .	56,9	1045	2620	2,50	$\frac{1-23}{1-10}$		598
69	Широкополочный двутавр $F=65,5$ см <sup>2</sup> , облицованный кирпичом толщиной 95,2 см с кирпичным заполнением между полками . . . . .	54,5	832	2820	3,38	$\frac{7-10}{5-30}$		680
57	Четыре уголка, соединенные заклепками с полосой, образуют стержень в форме широкополочного двутавра. Облицовка — типовые плиты толщ. 50,8 мм, армированные стружкой; слой гипсовой штукатурки 12,7 мм . . . . .	—	896	2639	2,94	$\frac{4-21}{4-05}$		565

Примечание. В графе 7 и в графе 8 таблицы в числителе даны пределы огнестойкости, в знаменателе периоды удлинения стальных стержней колонн.



Из рассмотрения кривой деформации этой колонны на рис. 19 видно также, что резкое укорочение стержня было отмечено примерно через 2 час. 30 ÷ 35 мин.

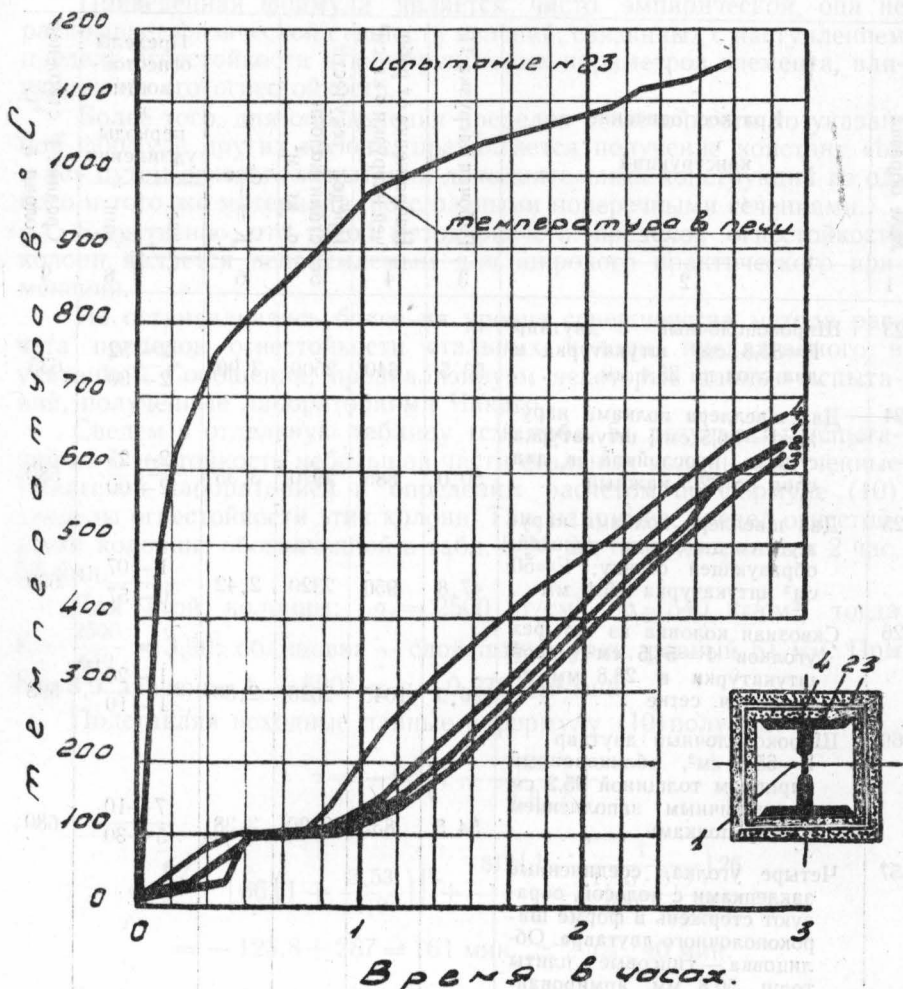


Рис. 18. График изменения температуры стальной колонны, защищенной штукатуркой толщиной слоя 51 мм.

Согласно же табл. 5, пределу огнестойкости колонны (2 час. 50 мин.) соответствует средняя критическая температура в  $635^{\circ}\text{C}$ .

Если следовать этим данным, то для температуры  $635^{\circ}\text{C}$  коэффициент запаса конструкции должен быть равен:

$$\gamma = \frac{700 - t_k}{400} = \frac{700 - 635}{400} = 0,163$$

или

$$K = \frac{1}{\gamma} = 6,15,$$

что не соответствует принятому в таблице 5  $K=3,9$ .

Таким образом, предел огнестойкости, полученный расчетом по формуле (10), фактически полностью совпадает с опытным его значением, отмеченным на указанных графиках. Величина же температуры в  $635^{\circ}\text{C}$ , согласно табл. 5, не может считаться критической для  $K=3,9$ , так как она была замерена после потери конструкцией несущей способности.

Колонна № 24, отмеченная в табл. 5, имела защитный слой штукатурки толщиной

$$\delta = 45 \text{ мм}; \quad \sigma_T = 2970 \text{ кг/см}^2; \quad \sigma = 885 \text{ кг/см}^2.$$

Отсюда  $K = \frac{2970}{885} = 3,35$ , тогда  $t_k = 580^{\circ}\text{C}$  и  $a = 0,260 \text{ см}^2/\text{мин.}$

Подставляя исходные данные в формулу (10), получим:

$$\begin{aligned} \tau &= -66 \left( 1 + \frac{3,53}{3,35} \right) + \\ &+ \sqrt{\left[ 66 \left( 1 + \frac{3,53}{3,35} \right) \right]^2 + \frac{812 \left( 1 - \frac{1}{1,75 \cdot 3,35} \right) 20,2}{0,260}} = \\ &= -135 + 265 = 130 \text{ мин. или } 2 \text{ час. } 10 \text{ мин.} \end{aligned}$$

Из рис. 19 видно, что укорочение колонны (т. е. ее предел огнестойкости) было отмечено также примерно через 2 часа 10 мин., хотя по данным Чикагской лаборатории предел огнестойкости этой колонны (указано на рис. 19 стрелкой, направленной вниз) считается равным 2 час. 25 мин.

При расчете колонны № 25 (см. табл. 5) \*) предел огнестойкости получен равным 58 мин., при расчете колонны № 26 — 1 час. 8 минут.

\*) Расчет этих колонн был произведен по формуле

$$\tau = -16,5 \left( 1 - \frac{3,03}{K} \right) + \sqrt{\left[ 16,5 \left( 1 - \frac{3,03}{K} \right) \right]^2 + \frac{185 \left( 1 - \frac{1}{1,75 \cdot K} \right) \delta^2}{a}},$$

применимой для колонн, имеющих  $K \geq 1,6$  и  $\tau \leq 1,5$  часа,

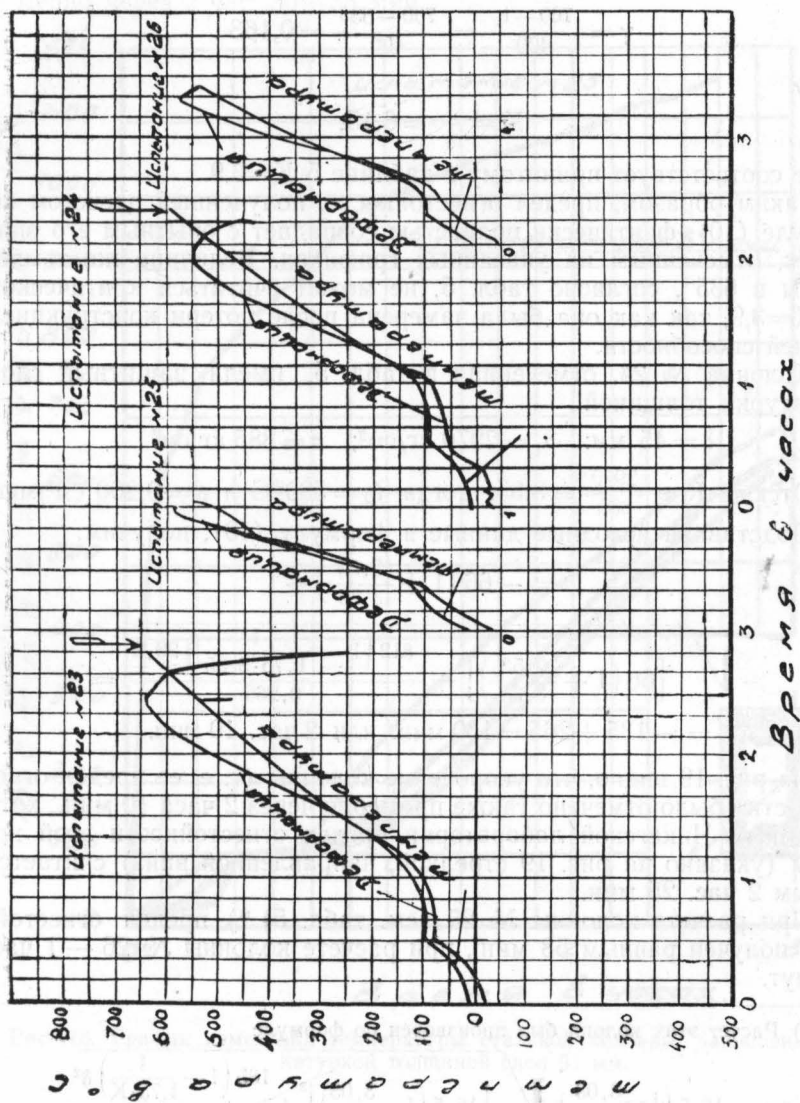


Рис. 19. График изменения деформаций колонн №№ 23, 24, 25 и 26, отмеченных в табл. 5.

Сравнивая полученные результаты с графиком на рис. 19, находим фактически полную сходимость расчетных данных с опытными полученными Чикагской лабораторией.

Из рассмотрения кривых на рис. 19, а также данных табл. 5 видно, что методикой Бюро Стандартов США предел огнестойкости принимается до полного физического разрушения колонн, включая разрушение облицовки, которая в расчет нагрузки для данного стержня колонны не входила. При этом существует два понятия — «предел огнестойкости» и «периоды удлинения» (расширения стальных стержней от температуры).

Величина предела огнестойкости состоит из периода удлинения и укорочения колонн, связанного с развитием пластических деформаций стали и работой до полного обрушения облицовки колонн. Как видно из кривых на рис. 19, для таких облицовок как штукатурка, отрезок времени от начала перегиба кривой деформации стержня до полного разрушения элемента, отмеченного стрелкой, составляет не более 20 мин.

Вместе с этим для некоторых прочных видов облицовок (например, кирпича) разница между «пределом огнестойкости» колонны (временем до полного разрушения, включая облицовку) и периодом удлинения является весьма существенной. Как указывалось выше, при таких облицовках, в определенный отрезок времени (после окончания периода удлинения стержня) от начала испытания, когда стержень колонны сильно деформируется и утрачивает несущую способность, включается в работу облицовка, разгружая стержень.

Примером этому служит колонна № 69 из таб. 5, имеющая предел огнестойкости 7 часов 10 мин., а период удлинения всего 5 час. 30 мин.

Чем объяснить, что после окончания удлинения полное разрушение колонны произошло спустя 1 час 40 мин. (см. рис. 20) и кривая прогиба, направленная к оси абсцисс, не имеет резкого перелома, как это было в других элементах конструкций (см. рис. 19).

Ответ на поставленный вопрос дан выше, а именно — после окончания периода удлинения, нагрузка передавалась не только на стержень, но и на кирпичную облицовку колонны.

Повидимому, подтверждением сказанного будет являться величина температуры стержня колонны, которая к 7 часам 10 мин. составляла  $680^{\circ}$ . Можно ли считать критической для данного стержня именно эту величину температуры? Найдем расчетом по данным табл. 5 для этой колонны величину критической температуры.

Имеем  $\sigma_T = 2820 \text{ кг/см}^2$ ,  $\sigma = 832 \text{ кг/см}^2$ , тогда

$$K = \frac{\sigma_T}{\sigma} = \frac{2820}{832} = 3,38 \quad \text{и} \quad t_k = 700 \left( 1 - \frac{832}{1,75 \cdot 2820} \right) \cong 580^{\circ} \text{C.}$$

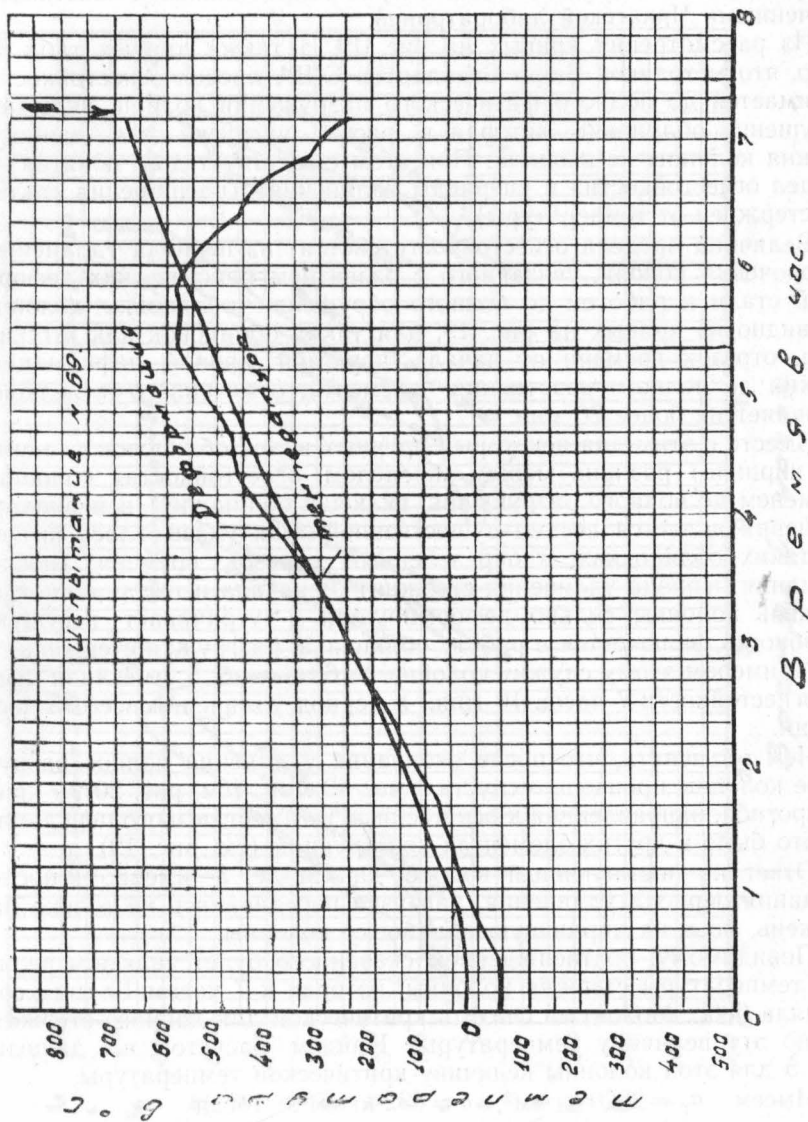


Рис. 20. График изменения деформаций колонны № 69 из табл. 5.

При температуре  $t_k = 580^\circ$  предел текучести стержня колонны должен был составлять:

$$\sigma_T^t = \sigma_T \gamma = \sigma_T \frac{1}{K} = 2820 \cdot \frac{1}{3,38} = 837 \text{ кг/см}^2, \text{ т. е.}$$

$$\sigma_T^t = \sigma \approx 832 \text{ кг/см}^2.$$

Иными словами, уже при температуре стержня порядка  $580^\circ \text{ C}$  коэффициент запаса стержня был исчерпан.

Об этом свидетельствует и характер кривой деформации колонны на рис. 20, т. к. именно при температуре стержня, равной  $580^\circ \text{ C}$  и отмеченной к 5 часам 50 мин. от начала опыта, кривая деформации колонны получила наклон в сторону оси абсцисс. Таким образом, предел огнестойкости этой колонны следует считать не 7 часов 10 мин., а 5 часов 50 мин., т. е. время, к моменту которого несущий элемент колонны (а не кирпичная облицовка, не включаемая обычно в расчет несущей способности стальных колонн) утратил свои рабочие функции.

Наконец, последний пример расчета предела огнестойкости колонны, приведенной в табл. 5 под № 5.

Для этой колонны  $\sigma = 896 \text{ кг/см}^2$ ;  $\sigma_T = 2639 \text{ кг/см}^2$ . Облицовка колонны — гипсовые плиты (50,8 мм) и гипсовая штукатурка (12,7 мм).

Принимая во внимание фактически однородный материал плит и штукатурки, общую толщину облицовки колонны получим равной  $\delta = 63,5 \text{ мм}$ .

Находим коэффициент запаса колонны:

$$K = \frac{2639}{896} = 2,94,$$

тогда:

$$t_k = 700 \left( 1 - \frac{1}{1,75 \cdot 2,94} \right) = 563^\circ \text{ C}.$$

Согласно табл. 2, для данного значения температуры  $a = 0,201 \text{ см}^2/\text{мин}$ .

Подставляя известные величины в формулу (10), получим:

$$\begin{aligned} \tau &= -66 \left( 1 + \frac{3,53}{2,94} \right) + \\ &= \sqrt{21100 + \frac{812 \left( 1 - \frac{1}{2,94 \cdot 1,75} \right) 40,3}{0,201}} = \\ &= -145 + 389 = 244 \text{ мин.} = 4 \text{ час. } 04 \text{ мин.} \end{aligned}$$

В соответствии с табл. 5, «период удлинения» этой колонны составлял 4 час. 05 мин. К этому времени и средняя температура

стержня колонны, равная в  $565^{\circ}\text{C}$ , фактически полностью совпадает с полученной расчетом в данном примере ( $563^{\circ}\text{C}$ ).

Из краткого анализа приведенных данных следует, что методика Бюро Стандартов США испытания колонн на огнестойкость не имеет четких границ, определяющих момент потери стальными конструкциями несущей способности в условиях пожара. Большие значения пределов огнестойкости ряда колонн, испытанных в США, не являются результатом особо надежных методов, применяемых при их изготовлении.

Объяснением этому служат, прежде всего, высокие коэффициенты запаса конструкций (от 2,5 до 3,9÷4) и, следовательно, больше значения критической температуры стержней колонн.

Включение на определенной стадии нагрева стальных стержней в работу облицовок искусственно расширяет период времени до полного разрушения колонн, в то время, когда сами стальные стержни фактически полностью исчерпывают несущую способность ранее указанного периода. Поэтому названный в методике Бюро Стандартов США «период удлинения» (или «период расширения»), правильнее рассматривать как предел огнестойкости колонны.

## VIII. Краткие выводы

1. При испытании стальных центрально сжатых колонн на огнестойкость критерием для определения момента наступления предела огнестойкости является достижение стальным стержнем колонны критической температуры.

Величина этой температуры не зависит от вида и толщины материала облицовки, формы и площади поперечного сечения стального стержня колонны. Она определяется величиной напряжения в стержне колонны, создаваемого нагрузкой, и зависит, следовательно, от коэффициента запаса конструкции —  $K = \frac{\sigma_r}{\sigma}$ .

Как отмечено в настоящей работе, величина критической температуры с точностью, достаточной для практических расчетов, может быть вычислена — при  $K \geq 1,6$  по формуле

$$t_k = 700 \left( 1 - \frac{1}{1,75K} \right),$$

при  $K \leq 1,6$  по формуле

$$t_k = 1250 \left( 1 - \frac{1}{K} \right).$$

2. На основании анализа результатов испытаний колонн на огнестойкость получены эмпирические формулы, позволяющие рас-



четным путем определять пределы огнестойкости конструкций при различных значениях коэффициента запаса, а также толщины и вида испытанных облицовочных материалов.

Для колонн, имеющих  $K \geq 1,6$ , предел огнестойкости может быть подсчитан по формуле:

$$\tau = -66 \left(1 + \frac{3,53}{K}\right) + \sqrt{\left[66 \left(1 + \frac{3,53}{K}\right)\right]^2 + \frac{812 \left(1 - \frac{1}{1,75 \cdot K}\right) \delta^2}{a}};$$

для колонн, имеющих  $K \leq 1,6$  — по формуле:

$$\tau = 256 \left(1 - \frac{2,85}{K}\right) + \sqrt{\left[256 \left(1 - \frac{2,85}{K}\right)\right]^2 + \frac{1450 \left(1 - \frac{1}{K}\right) \delta^2}{a}},$$

где:  $K$  — коэффициент запаса;

$\delta$  — толщина материала облицовки — в см;

$a$  — расчетный коэффициент температуропроводности материала облицовки в см<sup>2</sup>/мин.

Приведенные формулы применимы для расчета пределов огнестойкости колонн при  $\tau \geq 1,5$  часа и имеющих площадь поперечного сечения  $F \leq 70 \div 75$  см<sup>2</sup>.

Как показано в работе, предел огнестойкости до 1,5 часов имеют колонны с минимальной толщиной облицовки (например, при толщине слоя штукатурки в 25÷30 мм) и  $K > 1,6$ . Поэтому расчет предела огнестойкости колонн с  $\tau \leq 1,5$  часов практического значения не имеет.

Величина расчетного коэффициента температуропроводности «а» принимается по табл. 2 в зависимости от величины критической температуры, определяемой с помощью формул, приведенных в п. 1 разд. VIII данной работы.

3. При расчете предела огнестойкости колонн, площадь поперечного сечения металла в которых превышает 70 ÷ 75 см<sup>2</sup>, приращение предела огнестойкости, получаемое за счет увеличения сечения металла, учитывается по формуле:

$$\Delta \tau = 0,00508 \cdot C_t \cdot \Delta F (t_k - t_{II}),$$

где:  $C_t$  — коэффициент теплоемкости стали при данной температуре — ккал/кг °С;

$\Delta F = F - 70$  — приращение площади сечения данного стержня — в см<sup>2</sup>;

$t_k$  — критическая температура стержня — в °С;

$t_n$  — начальная температура стержня — в °С.

При расчете предела огнестойкости стальных колонн, имеющих  $F > 70 \div 75$  см<sup>2</sup>, сначала определяется  $\tau$  без учета влияния на величину предела огнестойкости колонны площади сечения металла, а затем производится подсчет приращения предела огнестойкости  $\Delta\tau$ . Полный предел огнестойкости колонны при  $F > 70 \div 75$  см<sup>2</sup> складывается из суммы:

$$\tau_{\text{полн}} = \tau + \Delta\tau.$$

4. Приведенные в работе расчетные данные и таблицы свидетельствуют о существенном влиянии на огнестойкость колонн заполнения их внутреннего пространства. Поскольку влияние заполнения зависит от его толщины, определяемой формой поперечного сечения стержней колонн, и расположения заполнения по отношению к стержню колонны, представляется целесообразным роль заполнения также учитывать расчетным путем.

Для этой цели могут быть использованы аналогичные с приведенными выше формулы, а именно:

$$\tau = 16,5 \left( 1 - \frac{3,03}{K} \right) +$$

$$+ \sqrt{\left[ 16,5 \left( 1 - \frac{3,03}{K} \right) \right]^2 + \frac{185 \left( 1 - \frac{1}{1,75 K} \right) \delta_3^2}{a}}$$

и

$$\tau = 87 \left( 1 - \frac{1,84}{K} \right) +$$

$$+ \sqrt{\left[ 87 \left( 1 - \frac{1,84}{K} \right) \right]^2 + \frac{330 \left( 1 - \frac{1}{K} \right) \delta_3^2}{a}}.$$

Первая из этих формул используется при  $K \geq 1,6$ , вторая — при  $K \leq 1,6$ .

Расчетная толщина заполнения ( $\delta_3$ ) в данном случае может приниматься как среднее арифметическое из толщин заполнения против каждой стороны стержня.

Величина «а» заполнения с достаточной для расчета точностью приравняется величине «а» для обычной штукатурки.

Учет расчетным путем приращения предела огнестойкости колонн за счет заполнения будет способствовать экономии основного материала облицовки, допуская в ряде случаев существенное снижение его толщины.

5. Из приведенных в работе опытных данных следует, что наиболее эффективными из числа испытанных материалов, используемых для облицовки стальных колонн, являются обыкновенный глиняный кирпич ( $1/4$  и  $1/2$  кирпича), керамические блоки и гипсовые плиты.

Вместе с этим облицовки в  $1/4$  кирпича, а также из керамических камней и гипсовых плит требуют ряда конструктивных мероприятий с целью сохранения этих облицовок при воздействии на них высокой температуры пожара. Перечень этих мероприятий (укладка в горизонтальные швы стальных хомутов, полосок сетки, обмотка облицовок стальной проволокой по спирали и т. д.) изложен в разд. VI п. 11 данной работы.

Основным мероприятием, которое в значительной мере должно улучшить сопротивляемость гипсовых плит усадке и трещинообразованию, является применение для облицовки стальных колонн гипсоволокнистых и гипсошлаковых плит (очевидно в равной мере положительное значение будет иметь включение в гипсовый раствор при отливке плит и некоторых других волокнистых материалов — минеральный войлок, минеральная вата и т. д.).

6. Предложенные в работе методы расчета пределов огнестойкости стальных колонн будут способствовать более экономному расходованию металла, используемого для изготовления стальных колонн и материалов, применяемых для их облицовки. Вместе с этим использование предлагаемых в настоящей работе выводов и рекомендаций позволит обоснованно назначать пределы огнестойкости стальных колонн, сочетая требования пожарной безопасности с требованиями всемерной экономии материалов и снижения себестоимости работ, связанных с изготовлением этих конструкций.

---

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Технические Правила по экономному расходованию металла, леса и цемента в строительстве (ТП 101—54). Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, Москва — 1954.
2. Противопожарные Нормы строительного проектирования промышленных предприятий и населенных мест (Н 102—54). Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, Москва — 1954.
3. Чл.-корр. АН СССР проф. **Н. С. Стрелецкий**, профессор **А. Н. Гениев**, к. т. н. доценты **В. А. Балдин**, **Е. И. Белея**, **Е. Н. Лессич**. Стальные конструкции. Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, Москва — 1952.
4. **Б. Г. Скрамтаев**, **Н. А. Попов**, **Н. А. Герливанов**, **Г. Г. Мудров**. Строительные материалы. Государственное издательство литературы по строительным материалам, Москва — 1953.
5. Fire Test of Building Columns. Underwriters' Laboratories. Chicago. Illinois 1917 ÷ 19.
6. Mithel Fire Tests of Columns protected with gipsum 1933. Vol 10 N 6, p. 737 — 755.
7. Граф. Испытание огнестойкости строительных материалов. Журнал «Brandschutz» 1932.
8. Fire Resistance Classifications of Building Constructions; Report BMS 92-Washington, USA, 1942.
9. Проф. **Н. А. Минкевич**. Свойства, тепловая обработка и назначение стали и чугуна Госмашметиздат, 1934 г.
10. Справочник — Конструкционные стали, том 1, Metallurgizdat, 1947 г.; под редакцией академика **Н. Т. Гудцова**.
11. Справочник — Теплотехника предприятий черной металлургии (под редакцией инж. **Тихомирова Н. Г.**, том 1, Metallurgizdat, 1953 г.).
12. **Я. С. Гинцбург**. Испытания металлов при повышенных температурах; МАШГИЗ, 1954 г.
13. **В. С. Федоренко**, статья «Огневые испытания строительных конструкций в полигонных условиях». Научно-технический сборник, ЦНИИПО, 1948 г.
14. **В. С. Федоренко**, статья «Огневые испытания строительных конструкций в полигонных условиях». Информационный сборник ЦНИИПО, издат. Коммун. хоз. РСФСР, 1950 г.
15. **В. С. Федоренко**, статья «О влиянии заполнения внутреннего пространства в стальных колоннах на их огнестойкость». Информационный бюллетень № 6, ЦНИИПО, 1956 г.
16. Информационный сборник ЦНИИПО. Огнестойкость строительных конструкций, изд. МХХ РСФСР, 1958 г. Статья **В. С. Федоренко** — «Методика определения пределов огнестойкости строительных конструкций».
17. Нормы и Технические Условия проектирования стальных конструкций (Н и ТУ 121—55). Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, Москва, 1955 г.
18. Исследования по жароупорным бетону и железобетону. ЦНИПС, Государственное издательство по строительству и архитектуре, 1954 г.

Инж. П. А. ФЕТИСОВ

## **ВЗРЫВООПАСНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИСКРЕНИЯ В ГАЗОПАРОВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ**

### **Введение**

Электрическая энергия имеет весьма широкое применение во всех областях народного хозяйства, включая и производства, опасные по взрыву и в пожарном отношении.

В связи с этим вопросы, связанные с опасностью воспламенения окружающей взрывоопасной среды при нормальном или случайном искрении в электрических устройствах, имеют большое значение.

Из отечественной и зарубежной практики известно, что исследования в определении зажигающей способности электрической искры проводились, но преимущественно в среде рудничного газа (метана), то есть применительно к угольной промышленности.

Благодаря этому электрооборудование в искробезопасном исполнении в угольной промышленности Советского Союза и за рубежом нашло довольно широкое применение, например, в Англии насчитывается около 300 видов шахтного искробезопасного электрооборудования.

По сравнению с оборудованием, выполненным в любом другом взрывозащищенном исполнении, оно значительно проще по изготовлению, имеет меньший вес и безопаснее в эксплуатации. Потому данный вид электрооборудования позволяет значительно расширить область применения электрических устройств во взрывоопасных помещениях, особенно устройств автоматики, управления, связи, сигнализации и т. п.

Искробезопасное электрооборудование представляет практический интерес не только для угольных шахт, опасных по газу (метану) или пыли, но и для других отраслей народного хозяйства (химической, нефтяной, нефтеперерабатывающей, лакокрасочной, азотной и др.), где имеют место другие взрывоопасные среды.

Однако, из-за отсутствия данных по искробезопасным параметрам в других средах Правилами устройства электроустановок (изд. Госэнергоиздат) применение открытого, не заключенного во взрывонепроницаемые оболочки электрооборудования, не разрешалось.

Только с получением в ЦНИИПО данных для ряда взрывоопасных сред представлялось возможным указанные Правила изменить. Теперь искробезопасные устройства и аппараты находят применение не только в шахтах, но и в надземных производствах других отраслей промышленности.

### 1. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка для проведения исследований зажигания различных газопаровоздушных смесей электрическими искрами представлена на рис. 1.

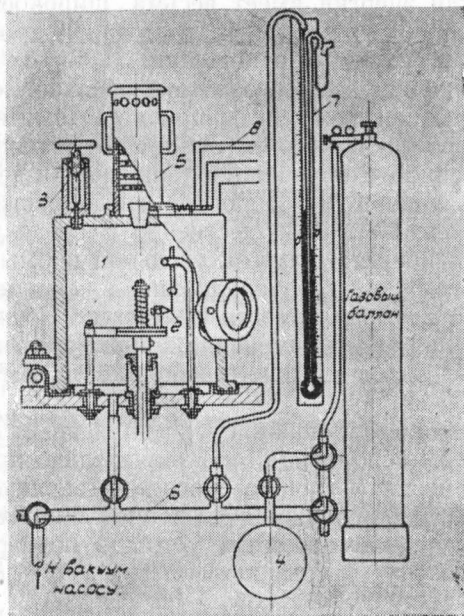


Рис. 1. Экспериментальная установка:

1 — взрывная камера, емкостью 5,1 л; 2 — механизм искрения; 3 — дозирующий игольчатый клапан для исследования паровоздушных смесей; 4 — промежуточный баллон; 5 — предохранительная пробка и глушитель; 6 — трубопровод; 7 — Ртутный манометр для определения вакуума в камере.

Установка имеет вытяжное вентиляционное устройство, автоматически действующее при возникновении взрыва смеси в камере.

Размыкающее электрическую цепь устройство со счетчиком числа произведенных искрений, применялось в трех вариантах:

1) в виде перпендикулярно пересекающихся стальных облуженных проволочек диаметром 0,26 мм. Искрение происходит в месте разведения проволочек;

2) в виде вольфрамовой иглы и стальной пластинки с заостренным концом. Искрение происходит в момент соскакивания острия пластинки с острия иглы.

3) в виде облуженных или оцинкованных проволочек  $\varnothing$  0,4 мм. Искрение происходит между концами этих проволочек.

Необходимо отметить, что при применении искрящих контактов по второму варианту токи воспламенения были получены в 1,5—1,9 раза меньшими по сравнению с током воспламенения по первому варианту искрящих контактов (с пересекающимися проволочками), а при применении по 3 варианту в  $1,1 \div 1,2$  раза меньшими по 2 варианту, что говорит о значении формы контактов на зажигающую способность искры.

Применение облуженных контактов снижает воспламеняющие токи по сравнению с токами, полученными на обычных не облуженных стальных контактах, что говорит о влиянии материала искрящих контактов на величину воспламеняющего тока.

## II. Методика исследований

Явление воспламенения (зажигания) газопаровоздушных взрывчатых смесей электрическими искрами, возникающими при размыкании электрической цепи, представляет сложный физико-химический процесс.

На воспламеняющую способность электрического разряда влияет много факторов, большинство из которых еще мало изучено. Основными из известных факторов являются: величина размыкаемого тока, индуктивность или емкость цепи и напряжение источника тока.

Существенное влияние на воспламеняющую способность оказывает также: форма, материал, чистота поверхностей контактов, а также в какой-то мере это зависит от барометрического давления, температуры окружающей среды.

Имеется несколько теорий воспламенения таких смесей, которыми объясняется качественная сторона этого явления. Однако при практическом решении вопроса о воспламеняющей способности



электрического искрения доступнее выявить экспериментальным путем количественную сторону этого явления.

Было установлено, что для этого достаточно выяснить вероятность (частоту) воспламенения смеси электрической искрой при определенных параметрах электрической цепи.

Согласно методике исследования, предложенной д. т. н. Кравченко В. С., вероятность (частота) воспламенения ( $P$ ) определяется как отношение числа воспламенений ( $m$ ) смеси в камере ко всему числу произведенных в камере искрений ( $n$ ), вызывавших это воспламенение.

$$P = \frac{m}{n}$$

Очевидно, чем больше произведено опытных искрений до возникновения взрыва смеси, тем точнее определится вероятность воспламенения. Установлено, что для получения необходимой точности экспериментирования достаточно в одной серии опытов получить 30 воспламенений (взрывов) ( $m$ ) смеси в камере. При этом суммарное число искрений ( $n$ ), вызвавшее это количество воспламенений, определяется по счетчику.

При исследованиях электрическая цепь составлялась из эталонных катушек индуктивностей, омического сопротивления, регулируемого реостата и источника питания (аккумуляторная батарея).

Подсчет необходимого количества газа или горючей жидкости, вводимой при создании смеси в камеру, производился по формуле:

$$X = \frac{AK}{100} \text{ мм. рт. ст.}$$

где:  $X$  — величина снижения вакуума в камере при введении в нее газа или горючей жидкости (мм рт. ст.);

$A$  — барометрическое давление (мм рт. ст.);

$K$  — наиболее легковоспламеняемая смесь по ее концентрации в % по объему.

Скорость размыкания контактов принималась: для индуктивных цепей — не менее 1,00 м/сек.; для практически безиндуктивных цепей (от 0,001 гн и меньше) — не более 0,5 см/сек.

При этих скоростях обеспечиваются условия для получения минимальных значений воспламеняющих токов.

Исследования проводились с учетом температуры окружающего воздуха (18—20°) и барометрического давления (730 ÷ 760 мм рт. ст.).

### III. Проведение исследований

Перед постановкой основных исследований предварительно проводились опыты по выявлению состава смеси, наиболее легковоспламеняемой от электрического искрения.

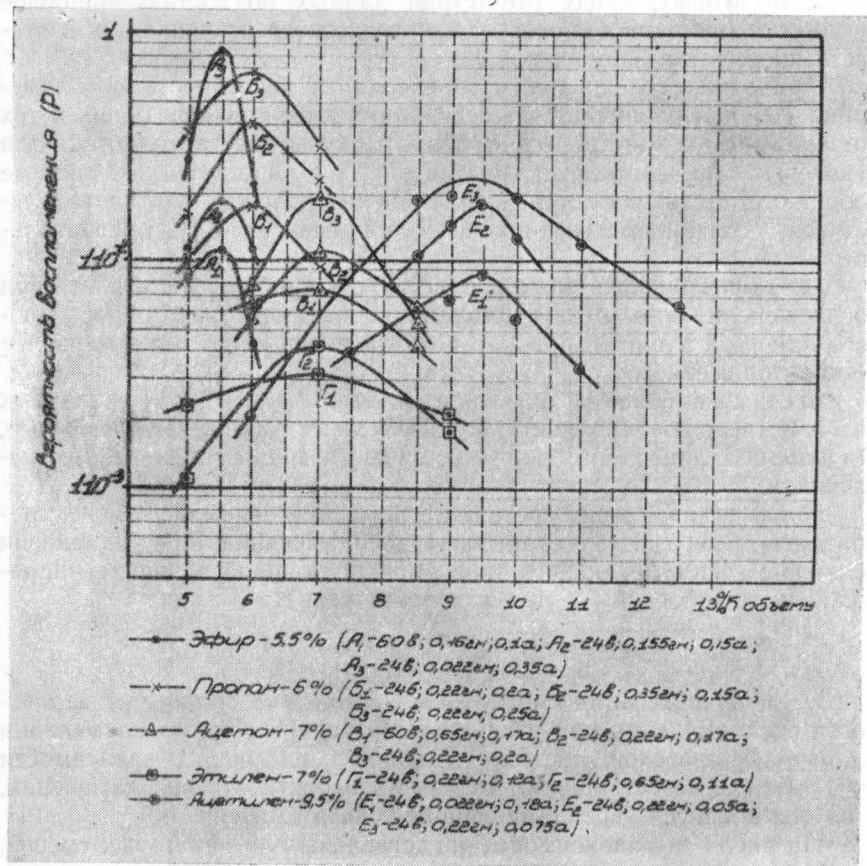


Рис. 2. Кривые вероятности воспламенения различных смесей в зависимости от концентрации горючего или газа в смеси.

Такое определение необходимо по двум причинам:

1. Во-первых, любая паро- или газо-воздушная взрывчатая смесь, характеризующаяся по наибольшему взрывному давлению или

по стехиометрическому соотношению (теоретически наивыгоднейшее соотношение компонентов смеси — паров горючего или газа с кислородом в воздухе, при которых происходит полное сгорание) часто не совпадает с составом смеси, наиболее легковоспламеняемой от электрической искры.

2. Во-вторых, ввиду отсутствия данных по составу наиболее легковоспламеняемых смесей от электрического искрения как в отечественной, так и зарубежной литературе.

При этих исследованиях определялась вероятность воспламенения ( $P$ ) при различных концентрациях смеси, но при одних и тех же параметрах электрической цепи. Полученные результаты для некоторых смесей представлены на рис. 2 в виде кривых в системе координат, где вероятность воспламенения отложена по вертикальной оси, а содержание газа по объему в процентах — по горизонтальной оси.

Из этих графиков можно видеть, что наибольшей вероятности воспламенения соответствует оптимальная концентрация паров горючего или газа в смеси, при которой эта смесь и является наиболее легковоспламеняемой.

Состав наиболее легковоспламеняемой смеси для различных газов, исследованных в институте, приведен в таблице 1. Кроме того, эта таблица дополнена данными, заимствованными из других источников.

После установления состава легковоспламеняемой смеси исследовалась зависимость вероятности воспламенения при изменении величины воспламеняющего тока (при постоянной величине напряжения источника тока и индуктивности цепи).

$$P = f(J) \quad \text{при } V \text{ и } L = \text{const.}$$

По полученным таким образом нескольким значениям вероятности воспламенения при различных значениях тока воспламенения в логарифмической системе координат на рис. 3 зависимости  $P = f(J)$ , где по оси ординат отложены вероятности воспламенения, а по оси абсцисс — воспламеняющие токи в амперах.

На рис. 4 эти зависимости представлены для некоторых смесей, полученные экспериментальным путем при напряжении источника 24 в и индуктивности цепи 0,22 генри.

Аналогичные зависимости были получены и при других величинах напряжения, а именно: 6 и 60 вольт и для индуктивностей от 0,0001 до 0,65 генри.

Как видно из рис. 4, полученные опытным путем графики на участке вероятностей воспламенения  $10^{-1} \div 10^{-3}$  (сплошные линии),

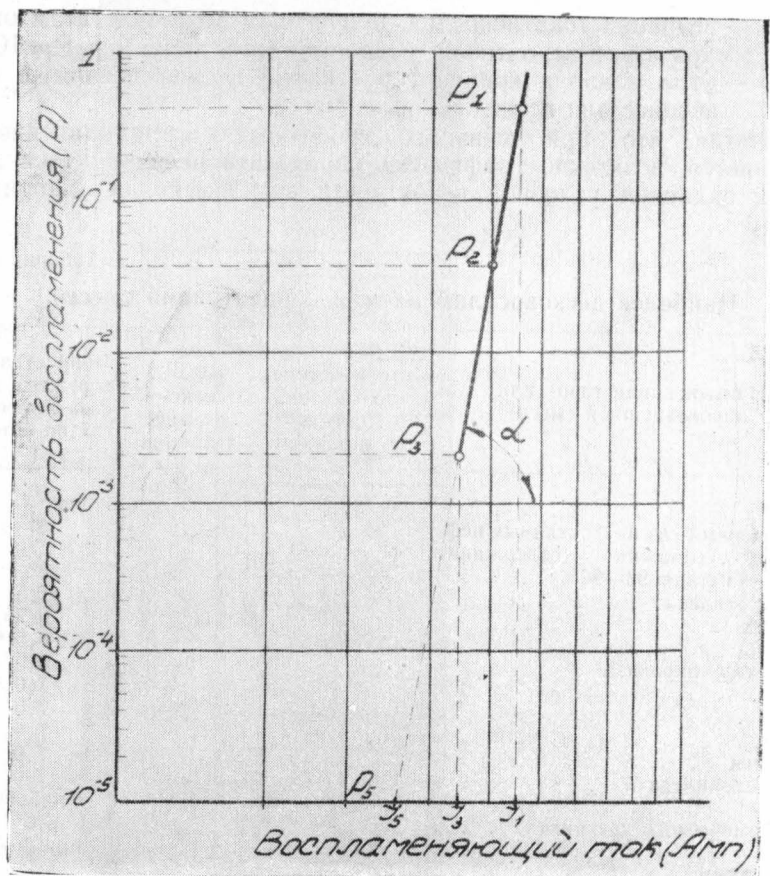


Рис. 3. Теоретическая кривая вероятности воспламенения смеси в зависимости от тока воспламенения при постоянстве параметров цепи и напряжения.

поскольку они построены в логарифмической системе координат, имеют прямолинейный характер и отвечают уравнению:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{J_1}{J_2} \right)^{\lg \alpha}$$

где:  $J_2$  — величина тока при искомой вероятности воспламенения, например  $P=10^{-5}$ ;

$J_1$  — величина тока искрения, полученная по результатам опытов и при вероятности воспламенения, например  $P=10^{-1}$ ;  
 $\alpha$  — угол наклона кривой вероятности воспламенения к оси абсцисс для исследованных смесей.

Считая, что при меньших вероятностях прямолинейность сохраняется, возможно графически определить величину тока для другой заданной условной вероятности воспламенения, например  $P_n=10^{-5}$ .

Таблица 1

**Наиболее легковоспламеняемая концентрация смесей**

Наименование газо- или паровоздушной смеси	% газа*** для стехиометрич. соотношен. смеси с воздухом	Соответств. макс. взрывн. давлению	Концентрация горючего или газа в процен- тах по объему
Водород . . . . .	29,5	32,3	20
Естественный газ из фонтанных неф- тяных скважин (содержание CH <sub>4</sub> — метана 93—96%) . . . . .	—	—	10*
Окись этилена . . . . .	7,8	11,0****	11,5
Ацетилен . . . . .	7,7	14,5****	9,25
Метан . . . . .	9,5	—	8,5**
Сухой газ пиролиза . . . . .	—	—	8,0*
Этан . . . . .	—	—	7,0**
Этилен . . . . .	6,5	—	7,0
Ацетон . . . . .	5,0	—	7,0
Пропилен . . . . .	4,5	—	7,0
Окись пропилена . . . . .	4,47	—	7,0
Пропан . . . . .	4,03	4,6****	6,0(5,0)**
Газ термического крекинга . . . . .	—	—	6,0*
Эфир . . . . .	этилов. 3,4	—	серный—5,5
Диэтиламин . . . . .	—	—	5,0
Бутан . . . . .	—	—	4,2**
Пентан . . . . .	2,6	—	4,2**
Гептан . . . . .	—	—	3,5
Толуол . . . . .	—	—	3,5
Бензин Б-70 . . . . .	—	—	3,5(121 мг/л)*
Бензол (уд. вес 0,9012) . . . . .	2,7	—	216,0 мг/л

\*) Данные ВНИИТБ МНП СССР.

\*\*) Данные Д. Морган «Принципы зажигания», Машгиз, 1947 г.

\*\*\*) Иост В. «Взрывы и горение в газах».

\*\*\*\*) Ульященко В. Исследование взрывоопасности смесей» отчеты ЦНИИПО.

Для этого достаточно продолжить линию вероятности до пере-  
сечения с осью абсцисс, соответствующей условной вероятности вос-



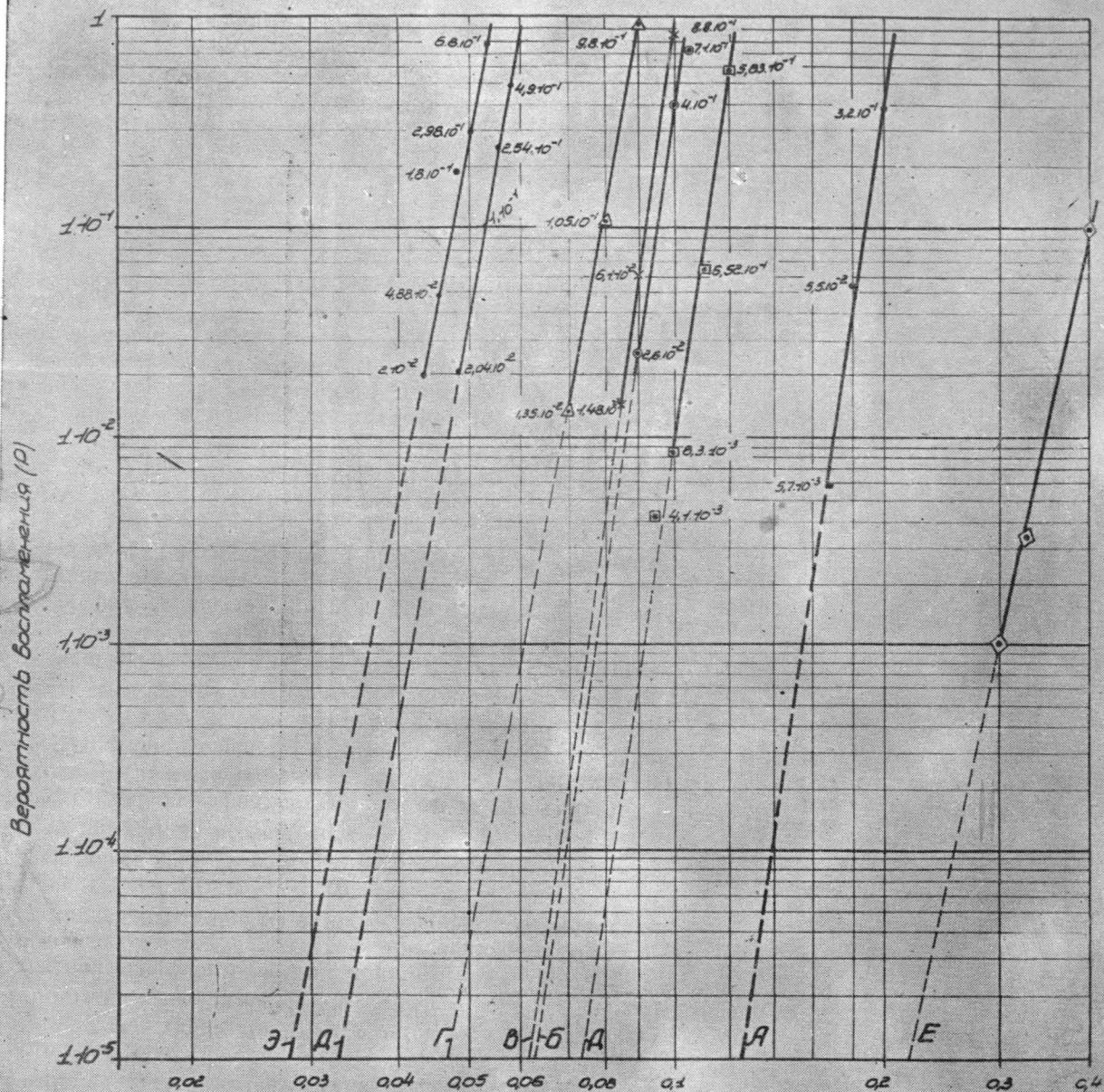


Рис. 4. Экспериментальные кривые вероятности воспламенения смесей в зависимости от тока воспламенения при напряжении 24 в и индуктивности 0,22 генри: Э — ацетилен; Д — водород, Г — этилен; В — ацетон; Б — пропан; А — эфир, и Е — метан (для метана по данным ИГДАН СССР).

пламенения. Точка пересечения укажет величину тока воспламенения.

Определение тока воспламенения можно произвести также расчетным путем, преобразовав вышеприведенную формулу в следующий вид:

$$J_2 = J_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\text{ctg } \alpha}$$

Для непосредственной оценки воспламеняющей способности электрического искрения удобнее пользоваться характеристиками искробезопасности.

Эти характеристики, также построенные в логарифмической системе координат, выражают зависимость воспламеняющего тока от изменения индуктивности электрической цепи  $J=f(L)$  при определенной постоянной величине напряжения источника тока ( $V=\text{Const}$ ).

Построение этих характеристик производилось по минимальным значениям воспламеняющих токов, отнесенных к вероятности воспламенения  $10^{-5}$ .

В английской практике безопасности принимается ток, который при 100 размыканиях электрической цепи не дает ни одного воспламенения смеси, но при увеличении на 50% — дает одно воспламенение. Такой ток соответствует вероятности воспламенения  $10^{-2} \div 10^{-3}$ .

При построении характеристик нами приняты токи, соответствующие вероятности воспламенения  $P=10^{-5}$ . В практических устройствах допустимые токи следует определять введением по отношению к токам при  $P=10^{-5}$  определенного коэффициента запаса в зависимости от условий и режима работы испытываемого устройства. По нашему мнению, такими коэффициентами могли бы явиться:

- а) для цепей нормально не искрящих — 0,7;
- б) для цепей нормально, но не часто, искрящих (кнопка, ключи и т. п.) — 0,5.

На рис. 5 приведены характеристики искробезопасности для некоторых взрывчатых смесей с воздухом при напряжении источника 24в, индуктивности электрической цепи от 0,0001 до 0,22 и 0,65 генри и вероятности воспламенения  $P=10^{-5}$ .

На рис. 6 приведены характеристики для тех же смесей, но при напряжении источника 60в.

Пунктирными линиями указаны характеристики, полученные при замедленном размыкании электрической цепи. Из этих харак-



теристик видно, что в цепях с индуктивностью 0,001 тн и меньше воспламеняющие токи при медленном размыкании контактов значительно меньшие по сравнению с токами при быстром размыкании.

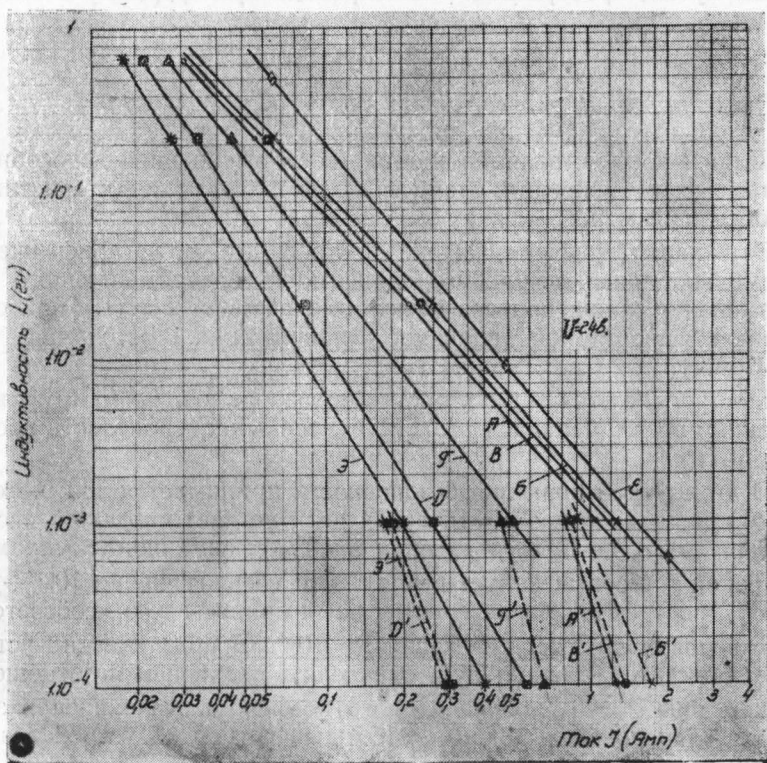


Рис. 5. Экспериментальные характеристики искробезопасности при вероятности воспламенения  $P=10^{-5}$  и напряжении 24 в:

Э — ацетилен; Д — водород; Г — этилен; А — эфир; В — ацетон; Б — пропан и Е — метан \*).

При этом линии характеристик практически параллельно смещаются в сторону меньших токов. При индуктивностях 0,01 и более замедленное размыкание не вызывает уменьшения воспламеняющего тока.

При оценке искробезопасности электрических устройств это следует учитывать.

\*) Для метана по данным ИГДАН СССР.

Из приведенных характеристик видно, что легче всего зажечь смесь ацетилена или водорода с воздухом и труднее — смесь пропана или метана. Смеси других газов или горючих жидкостей являются промежуточными между указанными смесями.

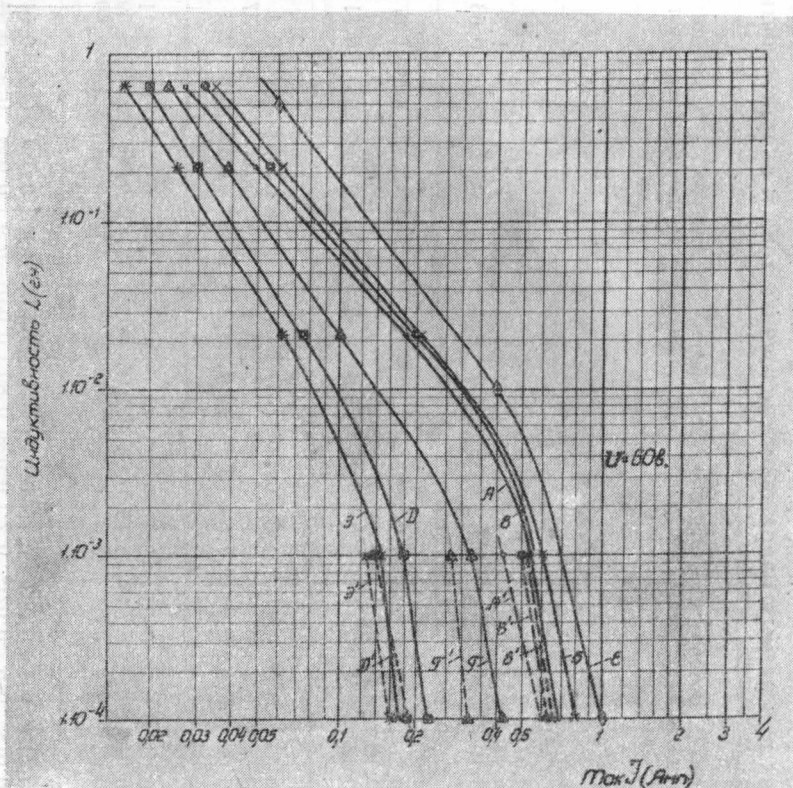


Рис. 6. Экспериментальные характеристики искробезопасности при вероятности воспламенения  $P=10^{-5}$  и напряжением 60 в:

Э — ацетилен; Д — водород; Г — этилен; А — эфир; В — ацетон; Б — пропан и Е — метан.

Значения некоторых минимально воспламеняющих мощностей и токов при вероятности воспламенения  $P=10^{-5}$  полученных при исследованиях для различных смесей, сведены в таблицы 2, 3, 4.

Таблица 2

Минимальные значения воспламеняющих мощностей и токов искрения в газопаровоздушных взрывчатых смесях при разных напряжениях источника тока и индуктивности цепи

Индук- тивность электри- ческой цепи, Гн	На- пря- же- ние, В	Ацетилено- воздушная		Водородо- воздушная		Этилено- воздушная		Эфиро- воздушная		Ацетино- воздушная		Пропано- воздушная		Метано- воздушная	
		Вт	а	Вт	а	Вт	а	Вт	а	Вт	а	Вт	а	Вт	а
0,0001	6	2,2	0,37	2,4	0,4	4,5	0,75	—	—	—	—	—	—	—	—
	24	6,5	0,27	7,2	0,3	16,3	0,68	31,0	1,3	33,6	1,4	36,0	1,5	—	—
	60	9,6	0,16	10,8	0,18	19,8	0,33	36,0	0,6	37,0	0,62	38,0	0,63	60,0	1,0
0,001	6	1,2	0,20	1,3	0,22	3,0	0,5	—	—	—	—	6,0	1,0	—	—
	24	3,8	0,16	4,3	0,18	10,8	0,45	19,2	0,8	20,4	0,85	21,6	0,9	36,0	1,5
	60	7,8	0,13	8,4	0,14	16,0	0,27	25,0	0,42	29,0	0,49	30,5	0,51	42,0	0,7
0,01	6	0,55	0,09	0,66	0,11	1,0	0,18	—	—	2,16	0,36	2,4	0,4	—	—
	24	2,0	0,082	2,4	0,1	3,8	0,16	7,2	0,3	7,9	0,33	8,9	0,37	10,8	0,45
	60	4,8	0,08	5,4	0,09	7,8	0,13	15,0	0,25	15,6	0,26	16,8	0,3	24,0	0,4
0,1	6	0,24	0,04	0,3	0,05	0,37	0,065	—	—	0,6	0,1	0,66	0,11	—	—
	24	0,9	0,037	1,0	0,045	1,45	0,06	1,95	0,082	2,15	0,09	2,3	0,095	7,8	0,13
	60	2,0	0,033	2,4	0,04	3,0	0,05	4,2	0,07	4,8	0,08	5,4	0,09	2,75	0,11
0,65	6	0,11	0,019	0,13	0,023	0,17	0,03	—	—	0,2	0,039	0,25	0,042	—	—
	24	0,4	0,018	0,5	0,021	0,7	0,028	0,89	0,037	0,9	0,038	0,95	0,04	3,6	0,06
	60	0,96	0,016	1,1	0,019	1,5	0,023	1,8	0,03	2,0	0,033	2,15	0,36	1,3	0,05

Таблица 3

**Минимальные значения воспламеняющих мощностей и токов при разных индуктивностях. Напряжение источника 24в**

Индуктивность электрической цепи, гн	Оксид этилена		Оксид пропилена		Гептан		Пропилен		Бензин Б-70	
	вт	ма	вт	ма	вт	ма	вт	ма	вт	ма
0,65	0,55	24	0,65	27,5	0,75	32	0,8	35	0,95	40
0,22	0,9	39	1,0	44	1,2	49	1,3	55	1,5	63
0,1	1,3	53	1,5	63	1,7	71	2,0	83	2,2	94
0,01	3,4	140	3,8	180	5,2	220	6,5	275	8,3	350
0,001	6,5	270*	8,3	350*	11,5	480*	15,2	640*	19,5	810*
	8,9	370	11,8	490	16,0	650	21	880	27,5	1150

\*) Токи при замедленном размыкании контактов.

Из данных таблиц можно видеть, что при практически безиндуктивных цепях ( $L=0,001$  до  $0,000$  гн) наибольшая передаваемая мощность (вт) в смесях достигает:

- а) в ацетилено-воздушной . . . . . — до 9,6
- б) в водородо-воздушной . . . . . — до 10,8
- в) в окись пропиленовоздушной . . . . . — до 19,0
- г) в этилено-воздушной . . . . . — до 19,8
- д) в эфирно-воздушной . . . . . — до 36,0
- е) в ацетонно-воздушной . . . . . — до 37,0
- ж) в пропано-воздушной . . . . . — до 38,0
- з) в бензино-воздушной . . . . . — до 38,0
- и) в метано-воздушной . . . . . — до 60,0\*)

Приведенные результаты работы института дают возможность практически решать вопросы при оценке различных паро- и газовоздушных смесей по их воспламеняющей способности от электрической искры размыкания, а также создавать для них искробезопасные устройства.

Полученные данные использовались при испытаниях на искробезопасности образцов электрических устройств и приборов, присылаемых в ЦНИИПО различными организациями и ведомствами.

\*) Для метана по данным ИГДАН СССР.

Таблица 4

**Минимальные значения воспламеняющих мощностей и токов  
при напряжении источника 60 в**

Смесь	Индуктивность, гн											
	0,65		0,22		0,1		0,01		0,001		0,0001	
	вт	ма	вт	ма	вт	ма	вт	ма	вт	ма	вт	ма
Окись про- пилена . .	1,3	22	2,2	37	3,0	50	7,8	130	15,0 18,5	250 310	19,0 24,5	325 410
Бензин (Б-70) . . .	2,2	35	2,6	60	5,4	90	18,0	300	30,0 36,0	500* 600	38,0 48,0	630* 800

\*) Токи при замедленном размыкании контактов.

Оценка искробезопасности этих образцов проводилась двумя путями:

1. Проверкой соответствия искробезопасным параметрам, полученным при исследованиях.
2. Путем непосредственного испытания электрических цепей данного устройства в условиях конкретной среды.

#### IV. Метод ускоренной оценки опасности электрического искрения

Несмотря на большую практическую ценность получаемых результатов, существующий метод оценки опасности электрического искрения требует больших затрат времени. Достаточно сказать, что при проведении таких исследований только в одной лишь среде при трех значениях напряжений требовалось не менее полугода. В то же время, если взять только смеси, имеющие промышленное значение, то их насчитывается несколько десятков.

В связи с этим крайне актуальной является разработка такого метода, который позволял бы без снижения ранее полученной точности, производить такую оценку в более короткое время.

Возможность создания такого метода основывается на следующих, выявленных в процессе исследования, закономерностях:

1. Полученные зависимости вероятности воспламенения при изменении величины воспламеняющегося тока  $P=f(J)$  во всех 12 исследованных смесях (включая метан) указывают, что вероятност-

ный характер воспламенения (зажигания) смеси электрической искрой размыкания действителен не только для среды метана, но и для всех других парогазовоздушных смесей и не зависит от различия физико-химических свойств каждой смеси.

2. Каждая из исследованных смесей на графике вероятностей (фиг. 4) имеет свое определенное местоположение по отношению к другим смесям, что определяет способность данной смеси к воспламенению от электрической искры.

3. Кривые вероятностей воспламенения для всех смесей практически параллельны между собой, то есть имеют почти одинаковый угол наклона их к оси абсцисс, табл. 5.

Таблица 5

**Величина угла наклона кривых вероятности  
воспламенения различных газопаровоздушных смесей**

Наименование смеси	Угол наклона
Смесь ацетилена с воздухом . . . . .	86°34'
Смесь водорода с воздухом . . . . .	86°34'
Смесь окиси этилена с воздухом . . . . .	87°25'
Смесь окиси пропилена с воздухом . . . . .	87°00'
Смесь этилена с воздухом . . . . .	87°38'
Смесь гептана с воздухом . . . . .	87°50'
Смесь эфира с воздухом . . . . .	87°34'
Смесь ацетона с воздухом . . . . .	87°43'
Смесь пропана с воздухом . . . . .	87°47'
Смесь метана *) с воздухом . . . . .	86°18'

\*) По данным ИГДАН СССР (В. С. Кравченко).

Как видно из приведенного, разница в углах наклона незначительна и колеблется в пределах от 0°16' до 1°29'.

Это отклонение объясняется, во-первых, невозможностью воспроизведения совершенно одинаковых условий искрения, и, во-вторых, неустойчивым характером зажигания смеси электрической искрой.

Поскольку разница в углах наклона получена небольшая, можно считать, что кривые вероятностей и для других смесей будут находиться в пределах найденных значений углов. Следовательно можно принять среднее значение угла и считать его постоянным для кривых вероятностей всех газопаровоздушных смесей.



Средняя величина угла наклона составляет:

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{\Sigma \alpha_{\text{он}}}{a} = \frac{870^{\circ}23'}{10} = 87^{\circ}2,3' \approx 87^{\circ} 2'$$

где:  $\Sigma \alpha_{\text{он}}$  — сумма углов наклона для всех исследованных 10 смесей;  
 $a$  — количество исследованных смесей.

Справедливость этого положения была проведена для ранее исследованных смесей и установлено, что:

а) показатель точности

$$\Pi = \frac{b \cdot 100}{\alpha_{\text{ср}}} = 0,19\%$$

где  $b = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{a}}$  и  $\sigma = \pm \sqrt{\frac{\Sigma \Delta \alpha^2}{a-1}}$

б) величины токов, подсчитанные, исходя из среднего значения угла наклона кривых по сравнению с токами, полученными экспериментальным путем, дают разницу не более 7 ма.

Как то, так и другое является вполне приемлемым для условий практики. Отсюда можно сделать вывод, что для определения минимального значения воспламеняющего тока в какой-либо еще неисследованной смеси нет необходимости строить вероятностные кривые  $P=f(J)$  по нескольким экспериментальным точкам. Достаточно определить координаты лишь одной экспериментальной точки. Затем провести через эту точку прямую под углом  $87^{\circ}2'$  до пересечения ее с осью абсцисс. Место такого пересечения укажет величину тока, соответствующей выбранной условной вероятности воспламенения.

Определение минимального тока может быть произведено также по ранее приведенной формуле (2), исходя из среднего значения угла и тока одного эксперимента.

4. При анализе характеристик искробезопасности, полученных для всех исследованных смесей (включая и метан) установлено, что они имеют одинаковый характер расположения их на графике зависимости  $J=f(L)$ .

Отличаются характеристики тем, что при напряжениях 6 и 24 в они имеют вид прямой, а при напряжении больше 24 в, в частности 60 в, — вид кривой.

Кроме этого, характеристики для каждой смеси в зависимости от напряжения, имеют не общий, как кривые вероятностей, а свой, определенный угол наклона относительно оси абсцисс. В то же время при напряжении 6 и 24 в на всем своем протяжении характеристики имеют один угол наклона, а при напряжении 60 в — два угла; один в интервале индуктивностей от 0,65 до 0,01 генри, и второй — от 0,001 до 0,0001 генри.



Для наглядности выявленная связь между воспламеняющим током, индуктивностью и углом наклона характеристик для смеси водорода с воздухом (левая линия) и для смеси этилена с воздухом (правая линия) представлена на рис. 7.

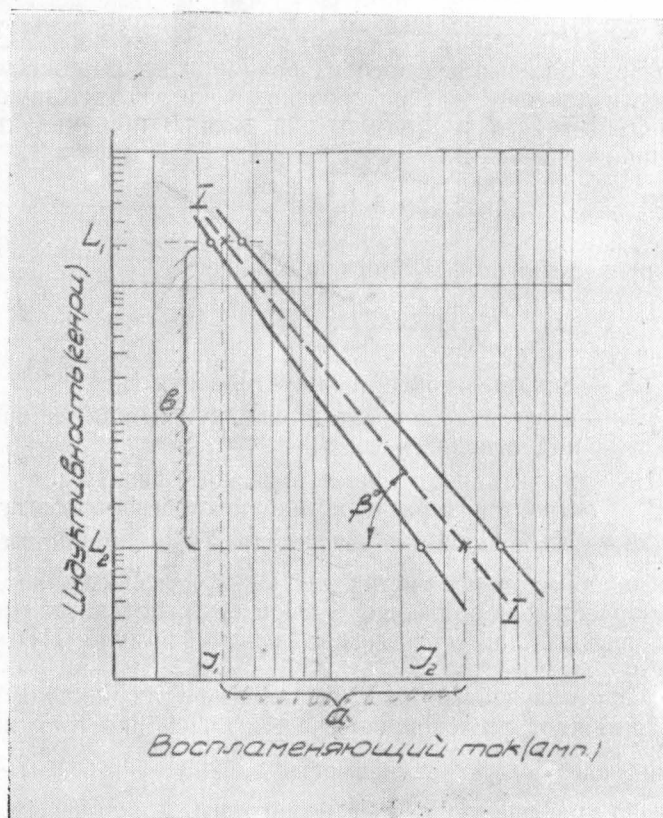


Рис. 7. Примерные кривые зависимости воспламеняющегося тока, индуктивности и угла наклона характеристик искробезопасности смесей водорода и этилена с воздухом.

На рис. 7 средней пунктирной линией 1—1 изображена характеристика для какой-то новой неисследованной паро- или газо-воздушной смеси.

Очевидно, что, несмотря на одинаковый характер расположения

характеристик, угол наклона каждой из них будет различным. Тангенс угла наклона характеристики может быть представлен:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\lg L_1 - \lg L_2}{\lg J_1 - \lg J_2} = \frac{\lg \frac{L_1}{L_2}}{\lg \frac{J_1}{J_2}} \quad (\text{III})$$

Произведя дальнейшее преобразование этого выражения, получим формулу для определения значения тока, соответствующее заданной индуктивности, например, для тока  $J_2$  при индуктивности  $L_2$ , а именно:

$$J_2 = J_1 \left( \frac{L_1}{L_2} \right)^{-\operatorname{ctg} \beta} \quad (\text{IV})$$

или для определения тока  $J_1$  при индуктивности  $L_1$ ,

$$J_1 = J_2 \left( \frac{L_1}{L_2} \right)^{-\operatorname{ctg} \beta} \quad (\text{V})$$

где:  $J_2$  — искомый ток при индуктивности  $L_2$ ;

$J_1$  — известная величина тока, полученная из опыта для индуктивности  $L_1$ ;

$L_1$  и  $L_2$  — индуктивности электрической цепи, для которых строится характеристика искробезопасности;

$\beta$  — угол наклона характеристики для данной смеси.

Углы наклона характеристик для каждой исследованной смеси, при трех значениях напряжения 6, 24 и 60 в, подсчитанные по результатам опытных данных для ( $L$  и  $J$ ) и по формуле (III), сведены в таблицу 6.

Используя полученные расчетом данные угла наклона характеристик, для каждой исследованной смеси имеем при трех значениях напряжения следующую зависимость  $\frac{J_2}{J_1} = \left( \frac{L_2}{L_1} \right)^{-\operatorname{ctg} \beta}$ , которая представлена графически, в виде номограмм, построенных в полупологарифмической системе координат, рис. 8, 9 и 10.

По оси абсцисс номограмм отложены значения токов, а по оси ординат — значения углов наклона характеристик искробезопасности. Наклонные линии соответствуют определенной величине индуктивности цепи.

Если наклонные линии номограмм пересечь горизонтальными линиями, то полученные точки пересечения будут соответствовать воспламеняющим токам, полученным для каждой исследованной смеси для данной индуктивности.

# Нограмма для 6 вольт при $P=10^{-5}$

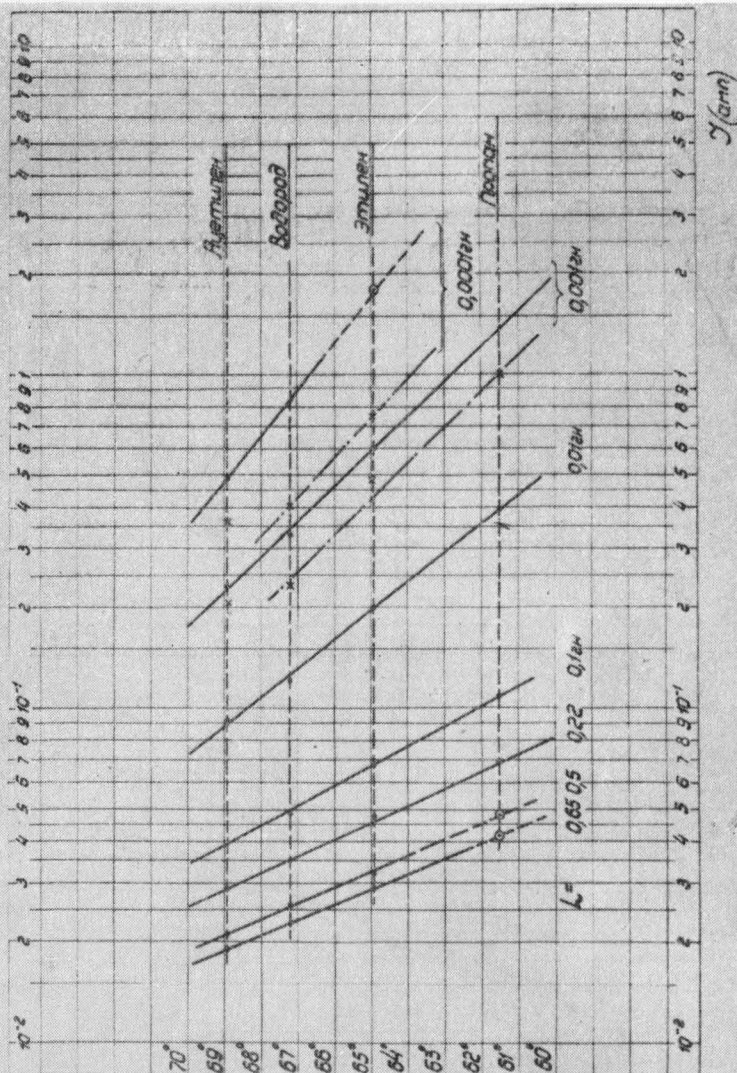


Рис. 8. Нограмма искробезопасности при напряжении 6 в постоянного тока в диапазоне индуктивностей от 0,0001 до 0,65 генри. Вероятность воспламенения  $P=10^{-5}$

Номерная для 24 в при  $P=10^{-5}$

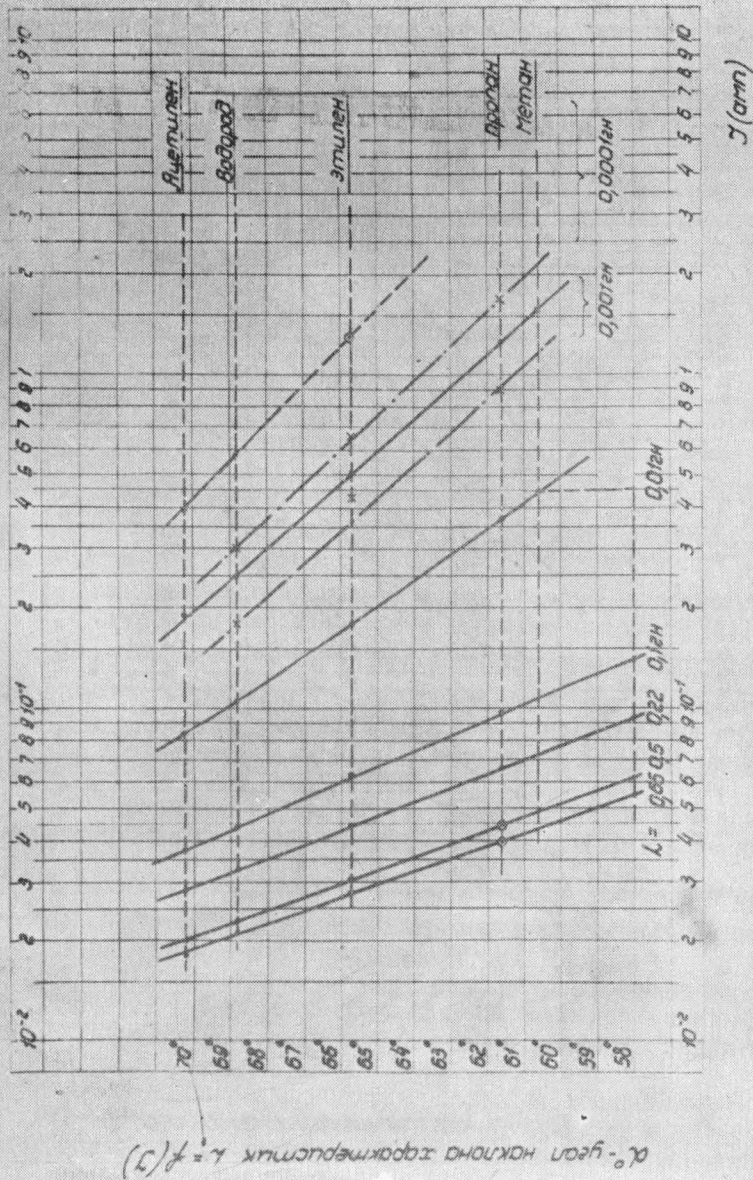


Рис. 9. Номера искробезопасности при напряжении 24 в постоянного тока в диапазоне индуктивностей от 0,0001 до 0,65 генри. Вероятность воспламенения



Нормирована для 500 при  $\rho=10^{-5}$

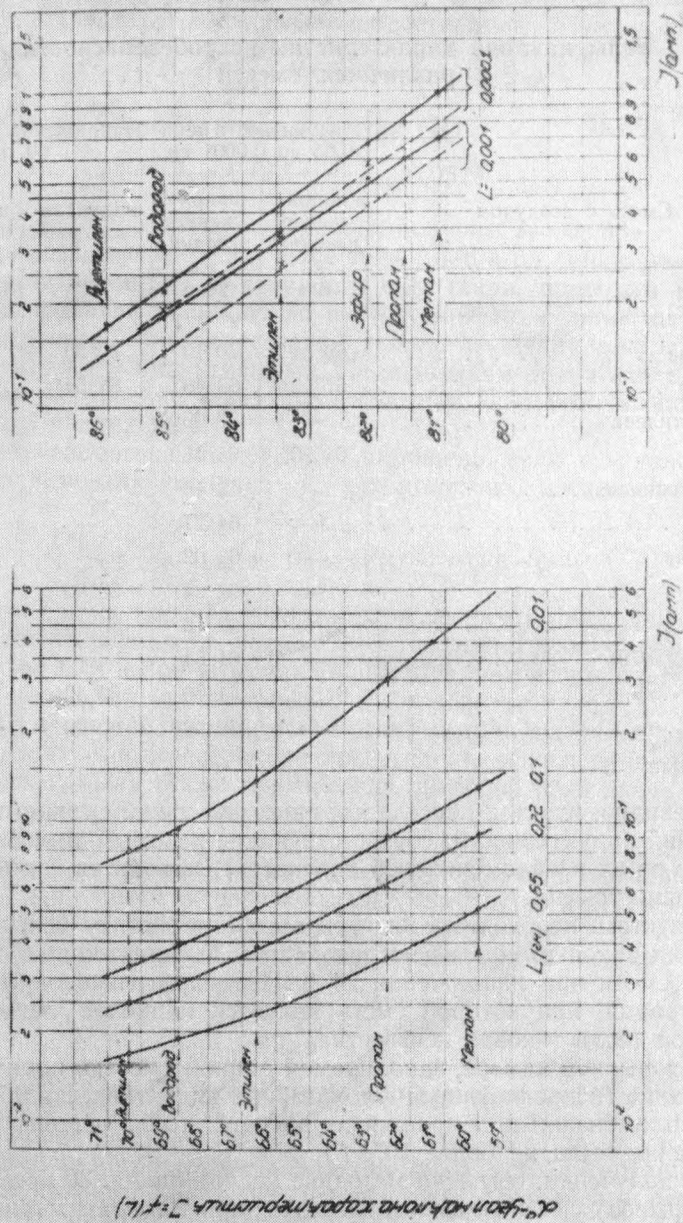


Рис. 10. Номограмма искробезопасности при напряжении 60 в постоянного тока в диапазоне индуктивностей от 0,0001 до 0,65 генри. Вероятность воспламенения

Таблица 6

**Углы наклона характеристик искробезопасности  
различных смесей**

Смесь с воздухом	Индуктивность цепи 0,65 до 0,0001 гн		Напряжение источника 60 в	
	напря- жение источни- ка 6 в	напря- жение источни- ка 24 в	индуктив- ность цепи 0,65÷0,01 гн.	индуктив- ность цепи 0,01÷0,0001 гн
Ацетилена . . . . .	68°54'	70°10'	70°20'	86°00'
Водорода . . . . .	67°12'	68 48	68°54'	85°20'
Окись этилена . . . . .	—	67 05	—	—
Этилена . . . . .	64°56'	65 45	66°36'	83°25'
Окись пропилена . . . . .	—	65 48	—	—
Гептана . . . . .	—	64 27	—	—
Пропилена . . . . .	—	63 02	—	—
Эфира . . . . .	—	62 24	66°00'	82°12'
Ацетона . . . . .	62°00'	62 12	65°45'	—
Бензина (Б-70) . . . . .	—	61 54	—	—
Пропана . . . . .	61°30'	61 36	62°42'	81°40'
Метана . . . . .	—	60 48	60°00'	81°10'

Очевидно, что для неисследованных еще смесей точки пересечения линий индуктивности, соответствующие искомому токам (в зависимости от их воспламеняющей опасности), находятся где-то между известными токами.

Допустим, необходимо построить характеристику искробезопасности для какой-то еще не исследованной взрывчатой газо-паровоздушной смеси при напряжении 24 в. Предварительно определяется концентрация, при которой смесь является наиболее легковоспламеняемой (если таковая неизвестна).

Во взрывной камере, заполняемой данной смесью, производится замыкание (искрение), предположим, при индуктивности 0,22 генри. Ток воспламенения подбирается из расчета, чтобы вероятность воспламенения была не более  $10^{-1}$ .

По получении, согласно методике исследования, 30 воспламенений (взрывов) смеси в камере, положим, при токе размыкания 0,05а,

было зафиксировано по счетчику 1200 искрений. Следовательно, вероятность (частота) воспламенения составляет:

$$P = \frac{30}{1200} = 0,025 = 2,5 \cdot 10^{-2}.$$

Подставив это значение в формулу (II)

$$J_2 = 0,055 \frac{10^{-5}}{2,5 \cdot 10^{-2}} 0,0518$$

и прологарифмировав это выражение, получим  $J_2 = 0,038$  а.

Перенеся полученное значение тока 0,038 а на линию номограммы, соответствующей индуктивности 0,22 генри, проводим из этой точки горизонтальную линию до пересечения ею с линиями других индуктивностей. Точки пересечения укажут величину тока, соответствующую каждой индуктивности. По значениям этих токов возможно быстрое построение всей характеристики искробезопасности для выбранного напряжения.

Определение тока может быть упрощено, если ток зажигания при экспериментах получен с вероятностью воспламенения в пределах

$$\frac{1}{10} \div \frac{1}{15} \quad \text{т. е.} \quad (P = 1 \cdot 10^{-1} \div 6,65 \cdot 10^{-1}).$$

В этом случае подсчет тока по формуле можно не производить, а применить коэффициент, равный 0,62 (соответствующий снижению тока при  $P = 10^{-5}$  и при угле наклона  $\approx 87^\circ$ ), как неоднократно проверенный на исследованных смесях.

Кроме проверки применимости этого метода на ранее исследованных смесях (ацетилена, водорода, этилена, эфира, пропана, ацетона, метана), была также произведена проверка и на вновь исследованных смесях: окись этилена, окись пропилена, гептана, пропилена, бензина Б-70.

Полученная разница (отклонение) по величине воспламеняющего тока, найденного экспериментально (из опыта) и путем расчета по формуле IV и V или номограмм, не превышает 4—5, 5%, что позволяет считать данный метод для практической оценки искробезопасности вполне приемлемым.

## Выводы

### а) По результатам исследований

Полученные результаты исследований указывают на возможность применения слаботочных электрических устройств (приборов автоматики, сигнализации, связи и т. п.) в искробезопасном исполне-



нии не только в угольной промышленности (в среде метана), но и в других предприятиях народного хозяйства, связанных с опасностью воспламенения других взрывных смесей (химической, нефтяной, лакокрасочной и др.).

Этот вывод имеет большое практическое значение, поскольку он открывает новые области безопасного применения электрической энергии в производственных условиях, где раньше использование электричества осложнялось применением тяжелых бронированных оболочек или вообще считалось недопустимым.

Полученные данные по искробезопасным параметрам могут явиться руководящим материалом, как при оценке опасности искрения существующих электрических устройств, так и при конструировании новых искробезопасных систем.

Результаты исследований позволили дополнить Правила устройства электроустановок (изд. Госэнергоиздат) при их переиздании в 1957 году нормативными данными по искробезопасным параметрам для трех сред: водорода, эфира и пропана. В настоящее время эти данные дополнены еще по 6 средам, а также расширена область их применения по напряжению до 60 в.

#### **б) По методу ускоренной оценки искробезопасности**

Новый предложенный метод оценки искробезопасности по сравнению с существующим является более простым при достаточной точности получаемых результатов.

Разница в токах, определяемых из опыта и по расчету, колеблется в пределах 4—5, 5% и меньше, что не имеет значения для практики.

По новому методу требуется значительно меньше времени как для построения кривых вероятности воспламенения, так и характеристик искробезопасности. Такое построение для напряжения до 24 в и всего диапазона индуктивностей от 0,0001 до 0,65 гн, возможно сделать по получению только одной экспериментальной точки.

При напряжении выше 24 вольт (в частности для 60 а) для построения характеристик достаточно получение двух экспериментальных точек.

## ПЕРЕЧЕНЬ

### образцов электрических устройств и приборов, испытанных в ЦНИИПО на искробезопасности

1. Сигнализатор аварии резервуаров. Источник питания напряжением 6 в постоянного тока. Индуктивность цепи 1,07 гн с железным сердечником. Наибольший ток в цепи 23 ма признан безопасным для применения в среде бензиновых паров.
2. Контактный сигнализатор. Источник питания напряжением 1,5 в. Максимальный ток искрения 1,5—3 ма. Безопасен для применения в среде бензиновых паров.
3. Электротермометрическая установка для измерения температур взрывоопасных сред. Источник питания напряжением 1,5 в. Максимальный ток в цепи 40 ма. Индуктивность цепи 6 мГн. (для применения в среде водорода).
4. Переносный газоанализатор типа ПГФ2-ВЗГ. Источник питания напряжением 4,5 в, постоянного тока; ток искрения 0,85 ма. Безопасен для сред: бензина, пропана, метана.
5. Магометр типа М1102. Номинальное напряжение 460 в, ток 0,55 ма. Безопасен для применения в средах бензина, пропана, метана.
6. Электрический датчик расходомера газов типа «Тар». Источник питания напряжением 12 в, максимальный ток искрения 25 ма. Безопасен для применения в среде этилена, пропана, метана.
7. Датчик (термометр сопротивления) типа ЭТП-45 электронного автоматического самопишущего прибора. Напряжение источника питания 1,5 в, ток 10 ма. Безопасен для применения в среде водорода.

8. Индукционный датчик измерителя давления взрывоопасной среды типа ИД-5; источник питания напряжением 1,1 в переменного тока. Наибольший ток в цепи 30 ма. Индуктивность цепи 0,15—0,2 гн. Безопасен для применения в среде водорода.

9. Индукционный датчик измерителя давления ИД-7. Источник питания напряжением 0,9 в переменного тока. Наибольший ток 35 ма. Индуктивность цепи 0,05 гн. Безопасен для применения в среде водорода.

10. Радиоактивный измеритель уровня в закрытой емкости жидкости, газа, сыпучих тел. Напряжение на датчике 380 постоянного тока при силе тока 0,5—1 ма. Индуктивность цепи 0,003 гн. Безопасен для применения среди водорода.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Таубкин С. И. «Исследование причин загорания хлопка-волокна при железнодорожных перевозках» . . . . . 3
2. Антонов Н. М. «Огнегасящая эффективность спринклерных и дренчерных систем в гаражах» . . . . . 24
3. Курбатский О. М. Результаты исследования тушения пожаров лесобирж 41
4. Лосев В. П., Казаков М. В. «Исследование синерезиса воздушно-механической пены из пенообразователя ПО-1» . . . . . 56
5. Федоренко В. С. «Об огнестойкости стальных центрально-сжатых колонн» . . . . . 68
6. Фетисов П. А. «Взрывоопасность электрического искрения в газопаровоздушных смесях» . . . . . 153

---

Редактор Шестаков А. Л.

Л 50152

Заказ. 5289

Тираж 1000 экз.

---

Типография им. Воровского