

П.2
Н 46

архив

НОВЫЕ СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ТУШЕНИЯ ПЛАМЕНИ НЕФТЕПРОДУКТОВ



ГОСТОПТЕХИЗДАТ · 1960

ЧИТАЛЬНЫЙ ЗАЛ

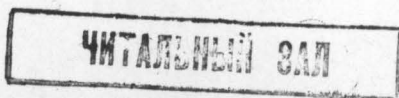
6с9,7
Н46
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ОБОРОНЫ
ЦНИПО

НОВЫЕ СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ТУШЕНИЯ ПЛАМЕНИ НЕФТЕПРОДУКТОВ

44762
СБОРНИК СТАТЕЙ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
НЕФТЯНОЙ И ГОРНО-ТОПЛИВНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
Москва 1960



А Н Н О Т А Ц И Я

Материал сборника охватывает круг вопросов, относящихся к тушению пожаров жидких топлив в резервуарах новыми способами и средствами — перемешиванием горячей жидкости, распыленной водой и комбинированными методами. Даны расчетные зависимости, описание конструкций систем пожаротушения и рекомендации по их применению. Расчетные данные, приведенные в сборнике, могут быть использованы при проектировании и эксплуатации противопожарных систем объектов нефтяной топливной, химической промышленности, железнодорожного, морского и авиационного транспорта.

Сборник предназначен для инженерно-технических работников пожарной охраны и техники безопасности, инженерно-технического персонала предприятий и проектных организаций топливной, нефтяной, химической промышленности, а также для преподавателей кафедр техники безопасности высших и средних технических учебных заведений.

Редактор А. Л. Шестаков

ВВЕДЕНИЕ

В настоящем сборнике публикуются результаты исследований, проведенных в 1957—1959 гг. Центральным научно-исследовательским институтом противопожарной обороны совместно с Энергетическим институтом АН СССР (ЭНИИ) в области горения нефтепродуктов и тушения пламени горючих жидкостей различными средствами.

Проведенные исследования позволили разработать новые способы и средства тушения пожаров нефтепродуктов, а именно: методом перемешивания горючей жидкости, путем применения мелкораспыленной воды и комбинированными методами, которые нашли применение в народном хозяйстве.

В сборнике даны расчетные зависимости, описание конструкций систем пожаротушения и рекомендации по их применению.

Эти данные могут быть использованы при проектировании и эксплуатации противопожарных систем объектов нефтяной, топливной, химической промышленности, железнодорожного, морского и авиационного транспорта.

О МЕХАНИЗМЕ ГОРЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ В РЕЗЕРВУАРАХ

Быстрый рост добычи, переработки и потребления нефтепродуктов в нашей стране привел к настоятельной необходимости найти пути более эффективного использования имеющихся и изыскания новых средств подавления горения нефти и продуктов ее переработки.

Совершенно ясно, что эта задача может быть успешно решена лишь тогда, когда мы получим более или менее полные сведения о механизме горения нефтепродуктов в резервуарах. Этого можно достичь, поставив соответствующие исследования так, как обычно ставятся физические исследования, при которых осуществляется строгий контроль за протеканием явления, вариация условий, ставятся отдельные опыты в упрощенных условиях. Очевидно, что здесь недостаточна только констатация фактов, а необходим глубокий, проведенный со знанием дела, анализ опытных фактов, основанный на использовании физики и химии. Необходимо стремиться к такому положению, чтобы науку о пожарах сделать одним из разделов физики горения.

В последние годы была проведена большая работа, существенно пополнившая наши представления о процессе горения нефтепродуктов. Значительный материал был получен группой сотрудников ЭНИН (Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского АН СССР) и ЦНИИПО.

1. Горение нефтепродуктов в резервуарах представляет собой очень сложное явление, где переплетаются и физические и химические процессы.

Горение жидкости представляет собой горение струи пара в воздухе. Поток пара к пламени поддерживается вследствие непрерывно идущего испарения. Кислород, необходимый для горения, поступает к пламени из окружающей газовой среды. Размер фронта пламени и скорость сгорания пара определяются в основном процессом образования горючей паровоздушной смеси. Горение жидкостей представляет собой вид так называемого диффузионного горения.

Уже первые систематические исследования показали, что форма и вид пламени существенно меняются при изменении диаметра горелки или резервуара.

При горении жидкостей в горелках диаметром не выше 10 мм пламя имеет резко очерченную коническую форму и не меняется с течением времени. При увеличении d начинаются пульсации пламени, которые совершаются с частотой 15–20 гц. При горении жидкости в горелках диаметром выше 20 мм верхняя часть пламени становится неустойчивой. С возрастанием диаметра горелки граница неустойчивой части смещается вниз. При $d = 150$ мм все пламя имеет причудливые, быстро меняющиеся очертания. В пламени нефтепродуктов, сгорающих в резервуарах диаметром, превышающим 1 м, ясно видны беспорядочные турбулентные движения.

Сложная картина пульсаций пламени явилась предметом ряда работ, из которых особенно обстоятельной является диссертационная работа, выполненная Маклаковым в Казани. К сожалению, в этой работе не вскрыты основные причины, обуславливающие пульсации пламени. Только в последнее время удалось выяснить эти причины и решить ряд вопросов, связанных со строением и поведением пламени.

2. Опыты показали, что не только форма и строение пламени, но и скорость горения жидкостей закономерно меняются с увеличением диаметра горелок и резервуаров. Это ясно видно из рис. 1, на котором по оси абсцисс отложен логарифм диаметра, по оси ординат — скорость выгорания жидкости.

Из рис. 1 видно, что при увеличении диаметра горелки скорость выгорания сначала быстро понижается, затем снижение идет медленнее, а потом наблюдается возрастание скорости горения с увеличением диаметра резервуара, и скорость v стремится к некоторому предельному значению. Увеличение диаметра резервуара от 1 до 23 м не приводит к значительному изменению скорости выгорания жидкости.

Надо отметить, что рассмотренная зависимость $v(d)$ охватывает изменение диаметра от 4 мм до 23 м, т. е. относится к области, в которой диаметр изменяется в 5000 раз (приблизительно).

3. Известно, что гидродинамический режим струи определяется величиной критерия Рейнольдса. Если произвести подсчет величины этого критерия для бензина, то получим такие результаты (табл. 1).

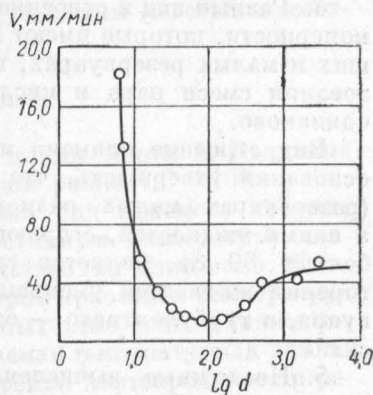


Рис. 1. Зависимость скорости сгорания автобензина от диаметра горелки.

Таблица 1

Диаметр резервуара, см	0,4	0,6	2,0	4,0	8,0	30,0	51,0	2290
Число Рейнольдса, Re . .	87	49	66	75	166	1380	2720	119 000

Из табл. 1 видно, что число Re для струи пара бензина (и других нефтепродуктов), горящего в горелках, невелико, значительно меньше критического. Число Re при горении жидкостей в резервуарах, диаметр которых больше 1 м, велико и превышает критическую величину.

4. Разный вид и строение пламени, а также различные закономерности, которые имеют место при горении жидкостей в больших и малых резервуарах, позволяют считать, что процесс образования смеси пара и кислорода в этих случаях протекает не одинаково.

Вид, строение пламени и значения критерия Рейнольдса дают основания утверждать, что при сгорании жидкости в горелках (резервуарах малых размеров) пламя является ламинарным, а пламя жидкостей, сгорающих в резервуарах, диаметр которых больше 80 см, является турбулентным. Скорость ламинарного горения жидкостей уменьшается с увеличением диаметра резервуара, а турбулентного — от диаметра резервуара почти не зависит.

5. Несложные вычисления позволили получить уравнение, описывающее форму ламинарного пламени. Теоретические данные и опыт с несомненностью показывают, что механизм и скорость реакции в пламени жидкости имеют второстепенное значение и что фактором, определяющим скорость процесса горения в факеле, является процесс подвода кислорода к зоне горения, процесс образования паровоздушной смеси. В ламинарном пламени этот подвод осуществляется благодаря молекулярной диффузии, а в турбулентном пламени — вследствие турбулентной диффузии.

Теория диффузионного пламени и позволила объяснить ряд интересных закономерностей, которые наблюдаются при ламинарном и турбулентном горении жидкостей. В частности, было установлено, что высота турбулентного пламени пропорциональна диаметру резервуара. Этот факт имеет существенное значение. Он дает возможность теоретического расчета температуры и более полного гидродинамического описания пламени.

Только что рассмотренные результаты позволили установить, что исследование процесса горения нефтепродуктов в резервуарах значительных размеров можно проводить на резервуарах диаметром 1—2 м.

6. Очень важным для теории горения и практики тушения пламени нефтепродуктов в резервуарах является вопрос о температуре и излучении пламени, но в этой области до последнего времени сделано очень мало.

Надо отметить, что измерение температуры и излучения турбулентного пламени представляет собой довольно сложную задачу. Измерения осложняются тем, что в каждой точке пламени температура быстро и беспорядочно меняется с течением времени. Здесь были бы очень удобными самопишущие фотоэлектрические пирометры. Схемы таких приборов разработаны, но они не выпускаются нашей промышленностью. Температура пламени измеряется или термопарами, или оптическими пирометрами с исчезающей нитью. Последние значительно удобнее. Но оптический пирометр дает, как известно, яркостную температуру, которая может сильно (на сотни градусов) отличаться от истинной температуры в зависимости от степени черноты измеряемого объекта. Истинная абсолютная температура T и яркостная абсолютная температура S , определяемая оптическим пирометром, связаны известным соотношением:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{S} + \frac{\lambda}{C_2} \ln \varepsilon,$$

где ε — степень черноты пламени для длины волны λ . Величина λ/C_2 для пирометра с красным фильтром равна $4,6 \cdot 10^5$.

В последние годы предложен целый ряд приемов, которые достаточно просто позволяют найти истинную температуру пламени и степень его черноты для соответственных длин волн. К таким приемам относится способ, при котором яркостная температура пламени определяется для двух различных длин волн, а также метод, в котором используется так называемая температурная лампа.

В 1955 г. при изучении процесса горения нефтепродуктов в резервуарах производилось измерение температуры пламени при помощи оптического пирометра с исчезающей нитью, снабженного красным фильтром, пропускавшим световые лучи с длиной волны $0,65 \text{ мк}$.

Несложные наблюдения показали, что через центральную часть пламени нефтепродуктов, сгорающих в резервуаре диаметром 260 см , совершенно не виден накаленный волосок 500-ваттной электрической лампы накаливания, следовательно, пламя непрозрачно для видимых световых лучей; для него ε практически равняется единице. Таким образом, оказалось, что яркостная температура центральной части пламени нефтепродуктов, сгорающих в резервуаре диаметром не меньше 260 см , практически одинакова с истинной температурой этого пламени.

Результаты описанных опытов приведены в табл. 2, из которой видно, что температура соответственного пламени бензина близка к 1150° .

Таблица 2

Номер опыта	20	21	17	19
Диаметр резервуара, см	130	130	260	260
Суммарная чернота пламени, ε_0	0.76	0.86	0.90	1.00
Яркостная температура, $^\circ\text{C}$	1120	1120	1130	1170

Надо заметить, что найденная температура значительно ниже теоретической температуры горения бензина, равной 2100° . Значительная разница между теоретической и найденной истинной температурой пламени бензина обусловлена сильным излучением пламени. По ориентировочным подсчетам, потери тепла исследованным пламенем путем излучения составляют примерно половину тепла, выделяющегося при горении бензина.

Для характеристики излучения пламени нефтепродуктов необходимо знать суммарную степень черноты ϵ_0 этого пламени. Эта величина была определена для пламени автобензина при помощи термостолбика, на который падало излучение пламени, заключенное в определенном телесном угле. Результаты таких измерений приведены в табл. 2, из которой видно, что ϵ_0 возрастает с увеличением диаметра резервуара и для $d = 260$ см оказывается близким к единице, но несколько меньшим последней. Этот результат вполне понятен. Известно, что излучение светящегося пламени, к которому относится и пламя нефтепродуктов, состоит в основном из излучения мельчайших углеродных частиц и зависит от концентрации и размеров последних, а также и толщины излучающего слоя. Кроме того, исследования показали, что степень черноты светящегося пламени зависит от длины волны и убывает с увеличением последней.

Более точные и полные сведения о температуре и излучении пламени нефтепродуктов, сгорающих в резервуарах, можно будет получить в результате более тщательно поставленных экспериментов и теоретических исследований. Некоторые шаги в этом направлении принимаются в настоящее время.

Следует подчеркнуть, что достаточно точные данные о степени черноты пламени являются важными не только для установления величины так называемых противопожарных разрывов и определения истинной температуры пламени, но и для решения основного вопроса теории горения жидкостей: каким путем передается энергия от пламени к жидкости.

7. Перейдем к описанию горячей жидкости.

Любой нефтепродукт представляет собой довольно сложную смесь углеводородов. Естественно, что эти смеси подчиняются законам теории растворов. Давно установлено, что состав пара над раствором, как правило, отличается от состава жидкой фазы. Составы жидкой и парообразной фаз совпадают только у так называемых нераздельно кипящих смесей. Смесь жидкостей при горении должна обогащаться той составляющей, концентрация которой в паре меньше, чем в жидкой фазе.

Согласно с только что сформулированным, поверхностный слой нефтепродукта во время горения обедняется легкими фракциями. Это установлено многочисленными данными опыта и не подлежит сейчас сомнению. О составе поверхностного слоя можно судить по его температуре.

8. Опыты показали, что температура на поверхности горящего бензина равна $100-110^{\circ}$, тракторного керосина 200° , солярового

масла 340—350°, нефти около 200°. Эти температуры меняются в зависимости от условий, но всегда оказываются выше температуры начала разгонки нефтепродукта.

Специальные эксперименты, проведенные с простейшими смесями органических жидкостей, позволили установить, что температура на поверхности сгорающей смеси близка, но несколько ниже температуры кипения жидкости, состав которой одинаков с составом смеси в поверхностном слое. Таким образом, температура в верхнем слое горящего нефтепродукта дает возможность судить о составе верхнего слоя горящего нефтепродукта.

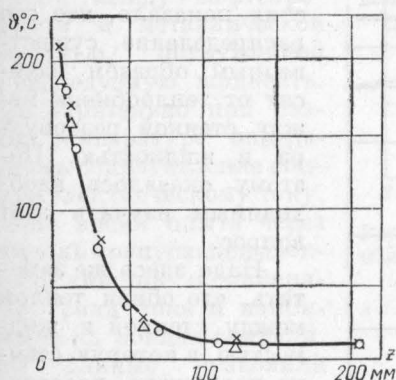


Рис. 2. Распределение температуры в слое керосина.

$d = 150 \text{ мм}; w = 0; \delta = 1 \text{ мм}.$

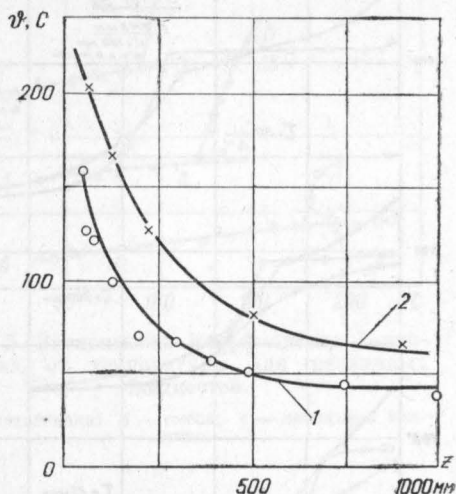


Рис. 3. Распределение температуры в слое дизельного топлива и на стенке резервуара.

$d = 1300 \text{ мм}, w = 0,4 \text{ м/сек}; 1 — \text{жидкость}; 2 — \text{подветренная стенка}.$

9. Тепло, получаемое жидкостью от пламени, вызывает нагревание жидкости. В последней устанавливается соответственное распределение температуры, определяемое способом переноса тепла с поверхности в глубь жидкости. Это распределение имеет важное значение для протекания процесса гашения пламени.

Температура в горящем керосине, дизельном топливе, соляровом масле и ряде других продуктов переработки нефти быстро понижается по мере удаления от свободной поверхности (рис. 2 и 3), подчиняясь простому закону:

$$\vartheta - \vartheta_0 = (\vartheta_{\text{п}} - \vartheta_0) e^{-kz}, \quad (1)$$

где ϑ_0 и $\vartheta_{\text{п}}$ — начальная температура жидкости и температура на поверхности последней; z — расстояние от поверхности; k — коэффициент.

При горении бензина и нефти возникает нагретый слой, толщина которого закономерно растет с течением времени и температура

тура одинакова с температурой на поверхности горячей жидкости (рис. 4). Температура под этим гомотермическим слоем быстро падает, подчиняясь соотношению (1), и на небольшом расстоянии от нижней границы нагретого слоя становится почти одинаковой с начальной температурой.

Образование гомотермического нагретого слоя в сильной степени затрудняет процесс тушения и потому выяснение причин,

обуславливающих образование слоя, имеет особо важное значение.

10. Изучение распределения температуры в горящих жидкостях показало, что это распределение существенным образом зависит от теплообмена между стенкой резервуара и жидкостью. Поэтому оказалось необходимым изучить этот вопрос.

Надо здесь же заметить, что обмен теплом между стенкой и жидкостью, в которую стенка погружена, исследован довольно полно, но эти исследования проводились с так называемыми индивидуальными жидкостями, а нефтепродукты представляют собой очень сложные смеси, в которых нередко находится значительное количество взвешенной воды. Поэтому пришлось провести серию дополнительных опытов с «сухими» и влажными нефтепродуктами.

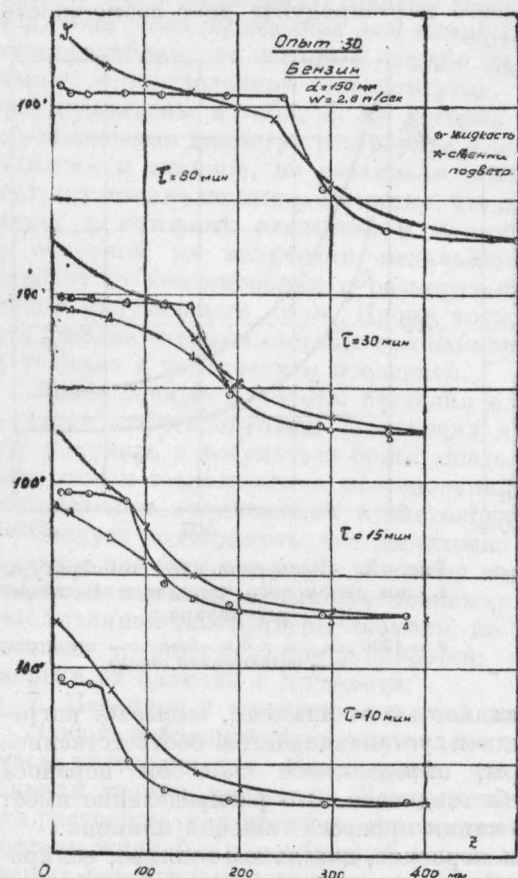


Рис. 4. Распределение температуры в слое бензина в различные моменты времени.

Эти эксперименты должны были дать представление о механизме обмена теплом в рассматриваемых случаях и сведения, относящиеся к началу кипения нефтепродукта на стенке.

Предшествующие исследования теплообмена между стенкой и жидкостью при свободном движении последней показали, что данные, полученные из опытов с различными жидкостями и телами разнообразной формы и различных размеров, в так называемых

обобщенных координатах укладываются на одну общую кривую и что для рассматриваемого процесса определяющим критерием подобия является комплекс $Gr Pr$. Форма тела в рассматриваемом процессе имеет второстепенное значение. Эти факты позволили изучить интересующий нас процесс не на резервуарах с горячей жидкостью, а в лабораторных условиях и на телах, удобных для экспериментов. В рассматриваемых опытах изучался обмен теплом между нефтепродуктом и металлической спиралью, погруженной в исследуемую жидкость. Предварительно при разной температуре определялось сопротивление спирали электрическому току.

Во время опыта через спираль пропускался электрический ток и измерялись сила тока и напряжение на концах спирали. Эти данные позволили найти тепловой поток и сопротивление, а значит и температуру нити. Опыты проводились с бензином, керосином, дизельным топливом, вазелиновым маслом и нефтью.

На рис. 5 и 6 приведены результаты опытов с бензином, дизельным топливом, смесью бензина и дизельного топлива и с «сухим» и увлажненным вазелиновым маслом. Здесь по оси абсцисс отложена температура, а по оси ординат — коэффициент теплообмена. Из рисунков видно, что результаты

$\alpha S \cdot 10^2$

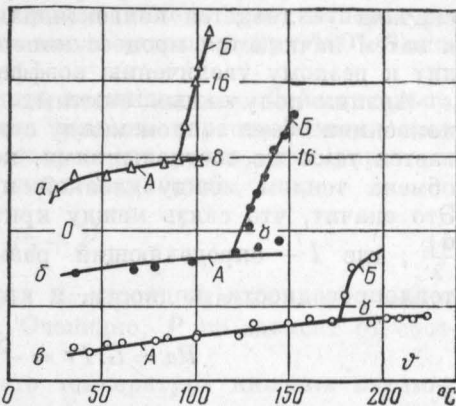


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплообмена от температуры для различных жидкостей.

a — автобензин; b — смесь; v — дизельное топливо.

$\alpha S \cdot 10^2$

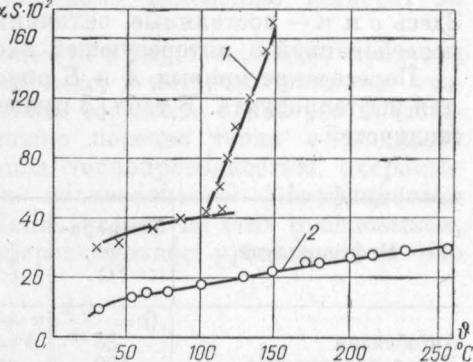


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплообмена от температуры для «сухого» и увлажненного вазелинового масла.

1 — увлажненное вазелиновое масло; 2 — вазелиновое масло.

опытов группируются около двух кривых. Одна кривая, которую в последующем для краткости будем называть кривой А, охватывает широкий температурный интервал, начинающийся вблизи начальной температуры жидкости, и очень медленно

поднимается вверх. Другая кривая (Б) относится к довольно узкому температурному интервалу и очень круто идет вверх.

Кривая А относится к области, где теплообмен осуществляется путем свободной конвекции. Зависимость $\alpha(\vartheta)$, описываемая кривой Б, относится к области так называемого ядерного (пузырькового) кипения. Таким образом, при повышении температуры сначала усиливается конвективная передача тепла к жидкости, а затем начинается процесс кипения жидкости, который приводит к резкому увеличению коэффициента α .

Анализ полученных опытных результатов показал, что при конвекции обмен теплом между стенкой и нефтепродуктом описывается теми же соотношениями, которые были установлены для обмена теплом между стенкой и индивидуальной жидкостью. Это значит, что связь между критерием Нуссельта Nu , равным $\frac{\alpha l}{\lambda}$, где l — определяющий размер тела, а λ — коэффициент теплопроводности жидкости, и критерием Рэлея

$$Ra = GrPr = \frac{\rho^2 c \beta l^3 g \Delta \vartheta}{\eta \lambda}, \quad (2)$$

где ρ , c , β и η — плотность, теплоемкость, коэффициент объемного расширения и вязкости жидкости; g — ускорение силы тяжести; $\Delta \vartheta$ — температурный перепад; может быть представлена в виде

$$Nu = c Ra^n. \quad (3)$$

Здесь c и n — постоянные величины. Опыты показали, что для исследованной и интересующей нас области $c = 1,23$, а $n = 0,16$.

Пересечение кривых А и Б определяет точку ϑ_k начала кипения нефтепродукта. В табл. 3 приведены эти точки для изученных жидкостей.

Таблица 3

Нефтепродукт	Температура, °C	Нефтепродукт	Температура, °C
Автобензин	88	Увлажненное вазелиновое масло	100
Дизельное топливо . .	180	Нефть	160
Тракторный керосин . .	138	Нефть, содержащая 3,6% влаги	100
Вазелиновое масло . .	260	Нефть, содержащая 12% влаги	100

Из табл. 3 видно, что наиболее низкая точка начала кипения была у бензина, который закипал при температуре, близкой к 90°. Кипение бензина протекает очень интенсивно. Точки начала

кипения других изученных нефтепродуктов оказались значительно выше ϑ_k бензина. Опытные данные ясно показали, что температура начала кипения нефтепродуктов на стенке всегда несколько выше температуры начала разгонки этих продуктов.

Заслуживают особого внимания результаты, полученные при исследовании теплообмена с влажными нефтепродуктами. Если «сухое» вазелиновое масло начинало кипеть при температуре, превышающей 260° , то влажное масло закипало при 100° . Такое же положение было и с нефтью.

Этот результат нельзя считать неожиданным. Действительно, вода и нефтепродукты являются взаимно нерастворимыми жидкостями. А в учебниках о растворах говорится, что упругость пара смеси взаимно нерастворимых жидкостей

$$P = P_1 + P_2, \quad (4)$$

где P_1 и P_2 — давления паров отдельно взятых компонентов смеси при данной температуре. Очевидно, P не зависит от соотношения взятых жидкостей.

Из формулы (4) следует, что температура кипения взаимно нерастворимых жидкостей должна быть ниже температуры кипения легко кипящей компоненты. Если $P_1 \gg P_2$, то $P \approx P_1$ и температура кипения смеси близка к температуре кипения низкокипящей жидкости. Именно поэтому температура кипения взятых смесей воды и нефтепродуктов оказалась равной 100° .

Рассмотренные результаты ясно показывают, что увлажнение нефтепродуктов приводит к сильному изменению температуры начала кипения их.

11. Перенос тепла с поверхности в глубь горящего продукта представляет собой сложный процесс, в котором принимает участие и конвекция. Для того чтобы составить некоторое представление об этом процессе, можно перенос тепла в жидкости рассматривать как перенос тепла теплопроводностью, охарактеризовав жидкость некоторым эквивалентным коэффициентом температуропроводности a_0 . Если, исходя из этих предпосылок, написать соответственное дифференциальное уравнение, то оно будет иметь вид

$$a_0 \frac{d^2 \vartheta}{dz^2} + v \frac{d \vartheta}{dz} = 0,$$

где v — скорость выгорания жидкости.

Решение приведенного уравнения будет идентично с соотношением (1), если положить, что $k = \frac{v}{a_0}$.

По величине эквивалентной температуропроводности a_0 или лучше по величине коэффициента конвекции $\varepsilon = a_0/a$, где a — молекулярная температуропроводность, можно судить об интенсивности соответственных конвективных течений, происходящих в жидкости.

Некоторые данные о величине коэффициента конвекции ε для ряда случаев следующие.

Тракторный керосин (опыты в помещении)

Диаметр резервуара, см	8	15	30	50
Коэффициент конвекции	3,5	4	4	6

Тракторный керосин (опыты на полигоне), $d = 490$ мм

Скорость ветра, м/сек	0	1	4	11	17	26
Коэффициент конвекции	15	14	33	39	23	20

К этим данным следует добавить, что коэффициент конвекции в верхнем нагретом гомотермическом слое оказался равным 9000 (приблизительно), а в переходном слое — 200. Данные говорят о том, что конвекция имеет место как в нефтепродуктах, сгорающих в помещениях, так и в жидкостях, горящих на открытом месте; при наличии ветра ε оказывается больше, чем при его отсутствии. Из данных можно видеть, что увеличение диаметра резервуара ведет к усилению конвективных течений. Интенсивность конвективных течений в гомотермическом слое во много раз больше интенсивности течений вне этого слоя.

12. Чем же обусловлены эти конвективные движения в горячей жидкости? Опытный материал показывает, что температура стенки резервуара всегда отличается от температуры горячей жидкости. Эта разность $\Delta\theta$ возрастает с увеличением диаметра резервуара и скорости ветра. На рис. 7 и 8 показано изменение $\Delta\theta$ с глубиной при горении тракторного керосина. Из рисунков видно, что максимальная величина этой разности в рассматриваемых опытах была равна 48° . Разность $\Delta\theta$ при отсутствии ветра и использовании меньших резервуаров была значительно меньше. Интересно отметить, что температура разных участков стенки, расположенных в одной и той же горизонтальной плоскости резервуаров значительных размеров ($d \geq 130$ см), была довольно велика и достигала иногда 100° .

В механике сплошных сред доказывается, что жидкость, которая в разных местах имеет разную температуру или концентрацию, может находиться в механическом равновесии, если выполняются вполне определенные условия. Если эти условия не выполнены, то в жидкости появляются конвективные течения, стремящиеся выравнять температуру или концентрацию. Конвективные токи в жидкости могут появиться и тогда, когда стенка имеет температуру, отличную от температуры жидкости. Интенсивность этих потоков определяется критерием Рэлея. Когда $Ra < 1600$, конвективные потоки не возникают, а передача тепла от стенки

к жидкости происходит путем молекулярной теплопроводности. При $Ra > 1600$ возникает ламинарная конвекция. Если же $Ra > > 2 \cdot 10^9$, то конвекция у стенки оказывается очень интенсивной и носит турбулентный характер.

Критерий Рэлея можно записать в виде

$$Ra = \frac{\rho^2 c \beta g l^3 \Delta \vartheta}{\eta \lambda} = b l^3 \Delta \vartheta,$$

где b — так называемый модуль конвекции, равный

$$b = \frac{\rho^2 c \beta g}{\eta \lambda}.$$

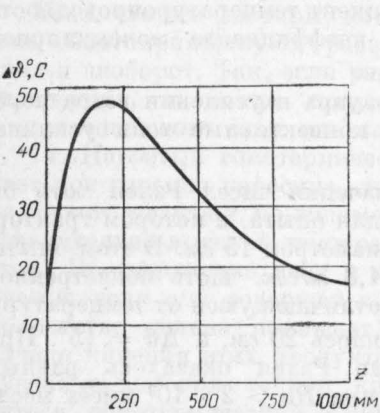


Рис. 7. Разность температур стенки и жидкости в зависимости от высоты слоя (тракторный керосин).
 $d = 1300$ мм; $w = 1,4$ м/сек.

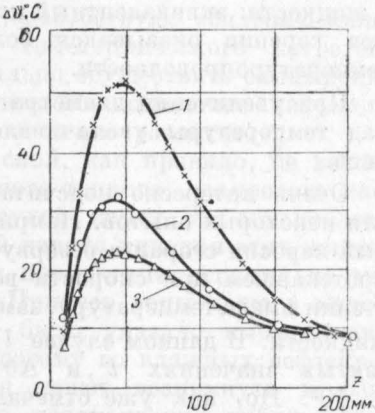


Рис. 8. Разность температур стенки и жидкости в зависимости от высоты слоя и скорости ветра (тракторный керосин, $d = 150$ мм).
 $\Delta \vartheta = \vartheta_{\text{ст}} - \vartheta_{\text{жидк}}$; 1 — 2,6 м/сек; 2 — 1,8 м/сек; 3 — 1,15 м/сек.

Величина модуля конвекции является показателем легкости возникновения конвективных потоков в среде и быстро возрастает с повышением температуры жидкости.

Значения модуля для некоторых нефтепродуктов следующие ($\vartheta = 100^\circ$).

Топливо	b
Автобензин	$5,4 \cdot 10^5$
Тракторный керосин	$2,0 \cdot 10^5$
Дизельное топливо	$1,0 \cdot 10^5$

Из этих данных видно, что величина b для рассматриваемых продуктов очень велика и конвективные токи в них возникают при малых перепадах температуры. Так, например, критическое значение величины $l^3 \Delta \vartheta$ для дизельного топлива равняется $0,016 \text{ см}^3$ ($^\circ\text{C}$), а для бензина и керосина — соответственно мень-

ше. Таким образом, при $l = 1$ см конвективные токи в дизельном топливе появляются при разности температур $\Delta\vartheta \geq 0,05^\circ$, а при $l = 10$ см — в тысячу раз меньше.

Вычисления показывают, что во всех опытах, которые производились при исследовании процесса горения нефтепродуктов в резервуарах, и во всех случаях, представляющих практический интерес, число Рэлея было значительно выше первого критического значения; следовательно, во всех приведенных случаях имели место конвективные течения, вызванные разностью температуры стенки и жидкости. Эта конвекция у стенки вызвала движения в остальной части жидкости и обуславливала более интенсивный, чем при чистой теплопроводности, перенос тепла в жидкости: эквивалентный коэффициент температуропроводности при горении оказывался больше коэффициента молекулярной температуропроводности.

При увеличении диаметра резервуара и усилении ветра перепад температуры увеличивался и конвективные токи усиливались.

Очень интересно подсчитать значения чисел Рэлея хотя бы для некоторых опытов. Например, для опыта, в котором тракторный керосин сгорал в резервуаре диаметром 15 см. В этом опыте, протекавшем при скорости ветра 1,8 м/сек, часть подветренной стенки имела температуру, заметно отличающуюся от температуры жидкости. В данном случае l равнялось 20 см, а $\Delta\vartheta = 15^\circ$. При взятых значениях l и $\Delta\vartheta$ число Рэлея оказалось равным $7 \cdot 10^9$. Но, как уже отмечалось, при $Ra > 2 \cdot 10^9$ имеет место турбулентная конвекция. Таким образом, в этом опыте конвекция у стенки была турбулентной. Интересно отметить, что коэффициент конвекции во взятом эксперименте, вычисленный на основании данных о распределении температуры, был равен 12 и не превышал значения соответственных величин для многих опытов.

Рассмотренный пример позволяет утверждать, что конвективные течения в жидкостях, сгорающих в широких резервуарах, являются довольно интенсивными и нередко оказываются имеющими турбулентный характер.

13. Выше было отмечено, что коэффициент конвекции в гомотермическом слое $\varepsilon \approx 9000$. Приведенный пример с горящим тракторным керосином показывает, что коэффициент ε , обусловленный конвективными движениями, вызванными перепадом температуры стенки и жидкости, даже при турбулентном характере конвекции оказывается равным десяткам единиц. Таким образом, возникновение гомотермического слоя обусловлено действием какого-то нового фактора. Какова же природа этого фактора?

Не будем касаться истории вопроса, а обратимся к рис. 4, на котором приведено распределение температуры в бензине и на подветренной стенке резервуара диаметром 15 см, в котором

44762
сгорал бензин, во время опыта, когда скорость ветра равнялась 2,6 м/сек. Из рис. 4 видно, что температура подветренной стенки в области гомотермического слоя была выше 100°. Но при $\vartheta = 90^\circ$, как показали опыты, бензин кипит. Следовательно, на стенке резервуара в области гомотермического слоя происходит кипение бензина. Это предположение подтверждается наличием бурунов у подветренной части стенки. Нормальное и интенсивное кипение на стенке может протекать потому, что на ней всегда имеется значительное количество центров парообразования. Очевидно, пузыри пара, возникшие на стенке, поднимаясь вверх, вызывают интенсивную циркуляцию и интенсивный перенос тепла в жидкости.

Ясно, что все факторы, которые способствуют усилению кипения, благоприятствуют развитию гомотермического нагретого слоя и наоборот. Так, если рационально осуществить охлаждение резервуара, то можно предотвратить возникновение нагретого гомотермического слоя или затормозить его развитие.

14. Нагретый гомотермический слой, как правило, не возникает при горении керосина, дизельного топлива, солярового масла, сухого мазута и, по-видимому, «сухой» нефти. Это обусловлено сравнительно высокой температурой начала кипения этих жидкостей. Но положение дела с этими продуктами решительно меняется, если они содержат влагу. Примесь воды даже в малом количестве сильно понижает, как было указано выше, точку начала кипения этих продуктов. Поэтому во влажных нефтепродуктах с высокой точкой кипения может возникнуть и развиваться гомотермический слой. Это неоднократно наблюдалось П. П. Павловым и А. М. Ховановой.

15. Опыты показывают, что вначале скорость изменения толщины гомотермического слоя остается практически постоянной, а затем постепенно уменьшается, и толщина слоя стремится к некоторой предельной величине, зависящей от рода топлива и от условий, в которых протекает процесс горения соответственной жидкости.

Оказалось, что зависимость толщины δ нагретого гомотермического слоя от времени достаточно хорошо характеризуется соотношением

$$\delta = \delta_t (1 - e^{-\mu t}), \quad (5)$$

где δ_t — предельная толщина слоя, а t — время, которое начинает отсчитываться от момента формирования слоя.

На рис. 9, где нанесены результаты опытов, а линия проведена в соответствии с формулой (5), показано, что последняя вполне удовлетворительно согласуется с опытом.

16. Экспериментальные данные, относящиеся к распределению температуры в горящей жидкости и на стенке, дали возможность объяснить картину зарождения и механизма возрастания толщины гомотермического нагретого слоя.

В начале горения стенка резервуара сильно нагревается. Это нагревание протекает особенно быстро и интенсивно тогда, когда жидкость горит на открытом месте и ветер отклоняет пламя, а последнее омывает стенки резервуара. На стенке начинается кипение жидкости. Пузырьки пара поднимаются вверх и вызывают интенсивные движения в верхнем слое: происходит зарождение гомотермического нагретого слоя. В то же время протекает изменение состава верхнего слоя, обусловленное неодинаковой концентрацией компонентов в газовой и жидкой фазах. Нагретый слой жидкости вызывает нагревание той части стенки резервуара, которая расположена вблизи нижней границы гомотермического

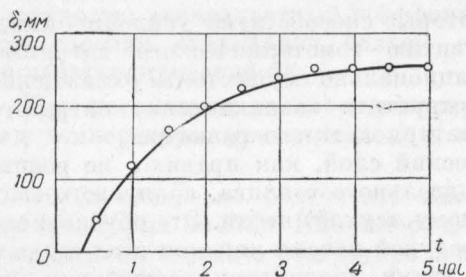


Рис. 9. Зависимость толщины нагретого гомотермического слоя от времени горения.

слоя способствует прогреванию стенки и возникновению кипения на ней, а кипение на стенке влечет за собой увеличение толщины нагретого слоя. При увеличении толщины нагретого слоя растут потери тепла стенкой резервуара, процесс перемещения границы гомотермического слоя замедляется, наконец, совсем прекращается.

Исходя из этих представлений, нетрудно прийти к формуле (5).

17. Далее рассмотрим влияние ветра на скорость выгорания жидкостей в резервуарах.

Давно было замечено, что с увеличением скорости ветра увеличивается и скорость выгорания жидкости. Для более полного выяснения этого вопроса были предприняты специальные опыты, во время которых ветер создавался мощным вентилятором и скорость воздушного потока, набегающего на резервуар с горящей жидкостью, менялась в пределах от 0 до 26 м/сек. Часть полученных экспериментальных данных приведена на рис. 10, на котором по оси абсцисс отложена скорость ветра, по оси ординат скорость горения жидкости.

Обработка опытного материала показала, что зависимость между скоростью горения v и скоростью воздушного потока w хорошо описывается соотношением:

$$v - v_0 = (v_\infty - v_0)(1 - e^{-\beta w}),$$

где v_0 — скорость выгорания жидкости при отсутствии ветра; v_∞ — предельная скорость сгорания жидкости; β — коэффициент.

Если ввести относительную скорость горения $u = v/v_0$, то найдем, что начальная быстрота изменения относительной скорости выгорания нефтепродукта

$$\left(\frac{du}{dw}\right)_{w=0} = \\ = (u_\infty - 1)\beta = v.$$

Экспериментальные данные, относящиеся к автобензину, тракторному керосину и дизельному топливу и приведенные на рис. 11 подтверждают, что начальная быстрота изменения скорости выгорания жидкости v уменьшается с увеличением диаметра резервуара d , а для резервуаров, у которых $d > 1,5$ м, оказывается сравнительно малой величиной; в этом случае скорость u медленно растет с увеличением скорости w воздушного потока.

Возрастание v с увеличением w обусловлено целым рядом причин. Одной из них является повышение температуры пламени

и, следовательно, увеличение излучения, а второй — возрастание количества тепла, которое жидкость получает от стенки. Как показывают опыты и несложные подсчеты, проведенные с использованием соотношений, установленных выше, оно оказывается довольно значительным, если ветер отклоняет пламя на стенки резервуара.

18. Таким образом, в настоящее время имеется довольно большой материал, позволяющий составить более или менее полное представление о процессах, происходящих при горении нефтепродуктов в резервуарах. Но целый ряд важных

u , мм/мин

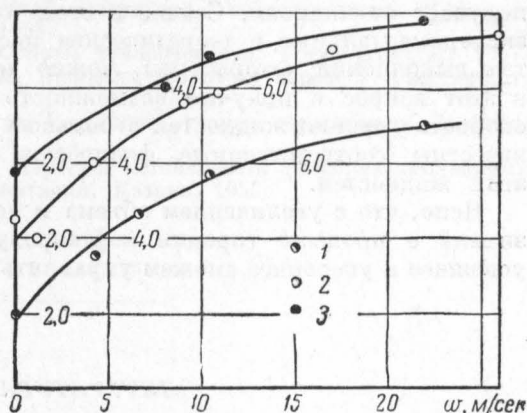


Рис. 10. Зависимость скорости выгорания жидкостей от скорости ветра.

1 — тракторный керосин, $d=300$ мм; 2 — то же, $d=490$ мм; 3 — дизельное топливо, $d=420$ мм.

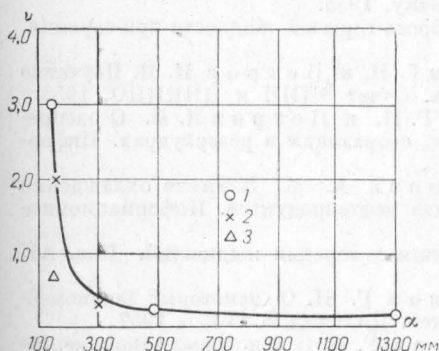


Рис. 11. Зависимость начальной быстроты изменения скорости выгорания от диаметра резервуара.

1 — дизельное топливо; 2 — керосин; 3 — бензин.

вопросов, относящихся к рассматриваемому типу диффузионного горения жидкостей, остался пока не выясненным. В частности, должным образом теоретически не разработаны вопросы, связанные со скоростью горения жидкостей. Ясно, что эта скорость определяется количеством тепла, которое жидкость получает от пламени, но недостаточно выяснено то, каким путем это тепло жидкость получает от пламени. Сейчас в этом направлении предприняты экспериментальные и теоретические исследования, по результатам выполнения которых мы, можно надеяться, внесем ясность в этот вопрос и получим возможность теоретически вычислять скорость горения жидкостей в больших резервуарах, если будут известны соответствующие физические и химические свойства этих жидкостей.

Ясно, что с увеличением объема и по мере углубления наших знаний о процессе горения нефтепродуктов в резервуарах мы успешнее и увереннее сможем управлять этим важным процессом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Холл. Вскипание нефти при горении в резервуарах. *Mechanical Engineering*, vol. 47, № 7, 1925.
2. Худяков Г. Н. Выгорание жидкости со свободной поверхности. *Известия АН СССР, ОТН*, 10—11, 1945.
3. Боргойн и Кэтон. Горение нефтепродуктов в открытых резервуарах. *Journal Institute of Petroleum*, vol. 33, 279, 1947.
4. Худяков Г. Н. О температурном поле в жидкости, горящей со свободной поверхности, и о факеле над ней. *Известия АН СССР, ОТН*, 7, 1951.
5. Блинов В. И. Об изменении состава бинарных смесей жидкостей при горении. Доклады АН СССР, 1953.
6. Коновалов Д. П. Об упругости пара растворов. Л., 1928.
7. Павлов П. П. и Хованова А. М. О горении нефтей и нефтепродуктов со свободной поверхности. Баку, 1955.
8. Блинов В. И. О явлении выброса горячей жидкости при горении. *Известия АН СССР, ОТН*, 2, 1955.
9. Блинов В. И., Худяков Г. Н. и Петров И. И. Изучение горения нефтепродуктов в резервуарах. Отчет ЭНИН и ЦНИИПО, 1955.
10. Блинов В. И., Худяков Г. Н. и Петров И. И. О распределении температуры в нефтепродуктах, сгорающих в резервуарах. Информационный сборник ЦНИИПО, 1957.
11. Павлов П. П. и Хованова А. М. Влияние охлаждения стенок резервуара на горение и тушение нефтепродуктов. Информационное письмо ЦНИИПО, 1956.
12. Блинов В. И. О трех режимах горения жидкостей. *Изв. АН СССР, ОТН*, 2, 1956.
13. Блинов В. И. и Худяков Г. Н. О некоторых закономерностях диффузионного горения жидкостей. *ДАН СССР*, 113, 5, 1957.
14. Блинов В. И. и Худяков Г. Н. О некоторых закономерностях, которым подчиняется горение жидкостей в резервуарах. Сб. Исследование процессов горения. Изд. АН СССР, 1958.
15. Гордов А. Н., Аржанов А. С. и др. Методы измерения температур в промышленности. ГНТИ, 1952.
16. Блинов В. И. О скорости горения бинарных смесей жидкостей. Информационный сборник ЦНИИПО, 1955.

17. Блинов В. И. и Худяков Г. Н. К вопросу о распределении температуры в нефтепродуктах, сгорающих в цилиндрических резервуарах. Информационное письмо ЭНИН, 7, 1958.

18. Блинов В. И. и Худяков Г. Н. О влиянии ветра на скорость сгорания нефтепродуктов в резервуарах. Информационное письмо ЭНИН, 8, 1958.

19. Блинов В. И., Володина Л. А. и Худяков Г. Н. Об обмене теплом между стенкой резервуара и нефтепродуктом. Информационное письмо ЭНИН, 9, 1958.

20. Михеев М. А. Основы теплопередачи. Госэнергоиздат, 1947.

21. Босворт Р. Ч. Л. Процессы теплового переноса. Гостехиздат, М., 1957.

22. Кутателадзе. С. С. Основы теории теплообмена. Машгиз, 1957.

23. Маклаков А. И. Изучение устойчивости открытых ламинарных диффузионных пламен. Диссертация. Казань, 1955.

О НЕКОТОРЫХ ВОПРОСАХ, ОТНОСЯЩИХСЯ К ГОРЕНИЮ И ТУШЕНИЮ ПЛАМЕНИ ЖИДКОСТЕЙ В РЕЗЕРВУАРАХ

При внимательном анализе опытных данных, опубликованных в печати и относящихся к горению и тушению пламени нефтепродуктов в резервуарах, обращают на себя внимание вопросы, имеющие существенное значение и не нашедшие надлежащего объяснения. Небольшому кругу таких вопросов и посвящена настоящая статья.

О температуре на поверхности горящего нефтепродукта

Еще в работе [1] отмечалось, что температура $\vartheta_{\text{п}}$ на поверхности горящего нефтепродукта оказывается ниже тогда, когда в жидкости возникает так называемый гомотермический нагретый слой и что $\vartheta_{\text{п}}$ понижается с ростом скорости u увеличения этого слоя.

Более или менее полное представление о зависимости $\vartheta_{\text{п}}$ от скорости возрастания u нагретого гомотермического слоя дано в работе П. П. Павлова и А. М. Ховановой [3], посвященной изучению горения эмульсионной нефти с различной влажностью в резервуаре диаметром 80 см. Результаты этой работы представлены на рис. 1, на котором по оси абсцисс отложена скорость роста u нагретого слоя, а по оси ординат — температура на поверхности; кружками обозначены опытные данные. Из рис. 1 видно, что $\vartheta_{\text{п}}$ закономерно и плавно понижается с увеличением скорости u .

Зависимость $\vartheta_{\text{п}}(u)$ может быть объяснена на основании простых соображений. Обозначим: Q — количество тепла, которое жидкость получает в единицу времени от пламени; q_1 — количество тепла, теряемого жидкостью в окружающую среду за тот же промежуток времени; q_2 и q_3 — количество тепла, расходуемого на испарение горячей жидкости и на нагревание последней, связанное с ростом гомотермического слоя. Все эти величины отне-

сем к единице поверхности. На основании закона сохранения энергии можно написать, что

$$Q = q_1 + q_2 + q_3. \quad (1)$$

Если диаметр резервуара не мал, то величиной q_1 можно пренебречь по сравнению с другими величинами, входящими в формулу (1). Далее, как нетрудно показать,

$$q_2 = c^* q v, \text{ а } q_3 = c q (\vartheta_{\text{п}} - \vartheta_0) u. \quad (2)$$

Здесь c^* , c , q , ϑ_0 и v — соответственно скрытая теплота испарения, теплоемкость, плотность, начальная температура и линейная скорость сгорания жидкости.

Подставив формулу (2) в (1) и произведя простые преобразования, получим

$$\vartheta_{\text{п}} - \vartheta_0 = \frac{Q - c^* q v}{c q u} = \frac{a}{u}. \quad (3)$$

К сожалению, в статьях Павлова и Ховановой [2, 3, 4] нет числовых данных об изменении скорости горения нефтей с изменением их влажности и только подчеркивается, что влага оказывает «... большое влияние на скорость выгорания нефти и нефтепродуктов» [4]. Указывается, что при содержании воды в эмульсионной нефти от 8 до 4% горение неустойчиво, а при влажности меньше 4% нефть горит устойчиво. Внимательное рассмотрение рисунков, приведенных в [3], позволяет заключить, что при изменении содержания воды в нефти от 0 до 3,8% скорость выгорания последней действительно сильно падает.

В статьях нет никаких характеристик факела пламени и, следовательно, нет данных, касающихся величины Q .

Некоторые сведения об изменении разности $Q - c^* q v$ можно получить следующим путем. Так как $Q - c^* q v = c q u (\vartheta_{\text{п}} - \vartheta_0)$, то произведение $u (\vartheta_{\text{п}} - \vartheta_0)$ характеризует изменение $Q - c^* q v$ с изменением влажности. Величина $u (\vartheta_{\text{п}} - \vartheta_0)$ приведена в табл. 1, из которой видно, что при изменении влажности b от 0 до 3,8% величина $a = Q - c^* q v$ не изменилась. Это произошло, по-видимому, потому, что $c^* q v$ менялась значительно быстрее, чем величина Q .

Если принять величину a постоянной, то зависимость $\vartheta_{\text{п}} - \vartheta_0$ от u изобразится для рассматриваемых опытов с эмульсионной нефтью кривой, приведенной на рис. 1, из которого видно, что

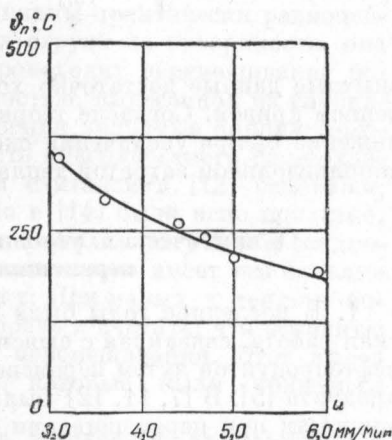


Рис. 1. Зависимость температуры на поверхности горящей эмульсионной нефти от скорости возрастания гомотермического слоя.

Таблица 1

b	u	$\vartheta_{\Pi} - \vartheta_0$	$u (\vartheta_{\Pi} - \vartheta_0)$
3,800	5,9	170	1000
0,700	5,0	190	950
0,450	4,7	220	1040
0,175	4,4	240	1050
0,100	3,6	270	970
0	3,1	330	1030

опытные данные достаточно хорошо располагаются около проведенной кривой. Согласие теории с опытом говорит о том, что понижение ϑ_{Π} при увеличении скорости прогревания и обусловлено дополнительной затратой тепла на нагревание жидкости.

О критических условиях гашения пламени при перемешивании жидкости

1. В последние годы была проведена большая исследовательская работа, связанная с выяснением механизма тушения пламени нефтепродуктов путем перемешивания их струей воздуха и нефтепродукта [5]. В [7, 11, 12] была установлена сложность движения жидкости при перемешивании ее и сделана попытка найти связь между величинами, характеризующими тушение пламени и гидродинамическую картину в жидкости. Здесь было высказано и подтверждено опытным материалом предположение, что при гашении пламени большое значение имеет скорость перемешивания в верхнем слое жидкости и что этой скоростью определяется закономерное уменьшение времени тушения пламени в зависимости от расхода воздуха и толщины слоя жидкости.

Важным шагом в развитии теории тушения пламени перемешиванием явились работы В. Ч. Реутта [13] и И. И. Петрова и В. Ч. Реутта [14]. Анализируя процесс тушения пламени, В. Ч. Реутт пришел к заключению, что результат применения перемешивания наиболее удобно выражать через время пробега элемента объема жидкости по поверхности последней и установил вид критериев подобия, которыми следует пользоваться при описании движения жидкости в поверхностном слое. Работа [14] явилась развитием и уточнением основных соображений, содержащихся в [13].

В статье [14], в разделе, посвященном критическим условиям потухания пламени, И. И. Петров и В. Ч. Реутт отмечают, что определяющим моментом при тушении пламени является теплообмен между факелом и жидкостью и теплообмен внутри самой жидкости. Скорость этих процессов зависит от скорости движения жидкости по поверхности, и только при времени пробега, меньшем критического значения, происходит гашение пламени.

К сожалению, в работе [14] остались вне поля зрения результаты, полученные при выполнении исследований, описанных в [11, 12], и, кроме того, не сделано даже попытки установить простыми теоретическими средствами связь между критическими значениями соответственных величин. Ниже описывается попытка исправить, хотя бы в некоторой степени, этот пробел.

2. Рассмотрим связь между временем тушения пламени и расходом воздуха при перемешивании жидкости последним. Ясно, что время тушения и время пробега, введенные в работе И. И. Петрова и В. Ч. Реутта, величины практически равноценные. Когда жидкость выбрасывается струей на поверхность, она растекается по последней. Здесь происходит перемешивание поверхностного слоя жидкости с жидкостью, вынесенной из глубинных слоев. В результате этого смешения холодные порции горючего нагреваются, а нагретая жидкость поверхностного слоя охлаждается. Этот процесс смешения и считался в [12] основным, определяющим гашение пламени. Но в [14] было ясно показано, что здесь очень важную роль играет и тепло, получаемое жидкостью от пламени. Очевидно, эта составляющая имеет тем большее значение, чем больше время тушения τ . При малых τ теплом, получаемым от пламени, можно пренебречь и считать, что основную роль при тушении играет процесс перемешивания. Этот вывод и был подтвержден теми данными, которые были приведены в [12].

Учтем теперь тепло, получаемое жидкостью от пламени, и установим связь между временем тушения τ и расходом воздуха. Обозначим: $\bar{\vartheta}_n$ — средняя температура в поверхностном слое жидкости, пламя которой гасится; ϑ_k — критическая температура, т. е. наиболее высокая температура, при которой жидкость еще не воспламеняется (не горит); T — абсолютная температура факела; ε и σ — степень черноты пламени и постоянная Стефана-Больцмана; A — поглощательная способность жидкости; τ — время тушения; ρ и c — плотность и теплоемкость жидкости; S — толщина поверхностного слоя, который перемешивается с жидкостью, поступающей из глубинных слоев; R — радиус резервуара; G — количество жидкости, протекающей в единицу времени через поверхностный слой.

Ясно, что

$$\pi R^2 S \rho c (\bar{\vartheta}_n - \vartheta_k) - \pi R^2 A \varepsilon \sigma T^4 \tau = G \tau \rho c (\vartheta_k - \vartheta_0). \quad (4)$$

Величина G зависит от расхода воздуха q и толщины слоя жидкости h . На основании результатов, полученных в [11],

$$G = \varphi(h) q^{2/3}. \quad (5)$$

Подставляя формулу (5) в (4), получим

$$\tau = \frac{b}{q^{2/3} - q_k^{2/3}}, \quad (6)$$

где

$$b = \frac{\pi R^2 S (\bar{\vartheta}_{\Pi} - \vartheta_K)}{\varphi(h) (\vartheta_K - \vartheta_0)} \quad \text{и} \quad q_K = \frac{\pi R^2 \varepsilon \sigma A T^4}{\varphi(h) c q (\vartheta_K - \vartheta_0)}.$$

Величину q_K , входящую в формулу (6), можно назвать критическим расходом воздуха. Тушение пламени наступает только тогда, когда $q > q_K$; при расходе воздуха, меньше критического, тушение пламени воздухом при данных условиях осуществлено быть не может.

Соотношение (6) отличается от (8''), приведенного в [12], наличием в знаменателе критической скорости подачи воздуха q_K ,

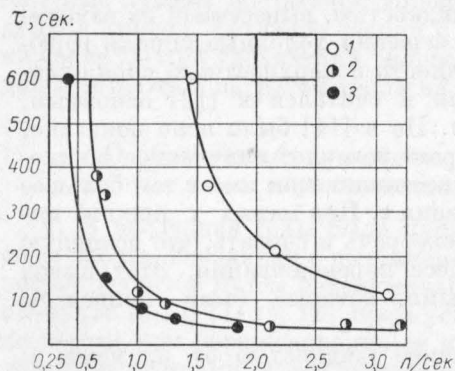


Рис. 2. Зависимость времени тушения пламени от скорости подачи воздуха в дизельное топливо и керосин.

1 — дизельное топливо, $d = 260$, $\tau = 30$;
2 — дизельное топливо, $d = 260$, $\tau = 2$; 3 — керосин, $d = 130$, $t = 40$ мм.

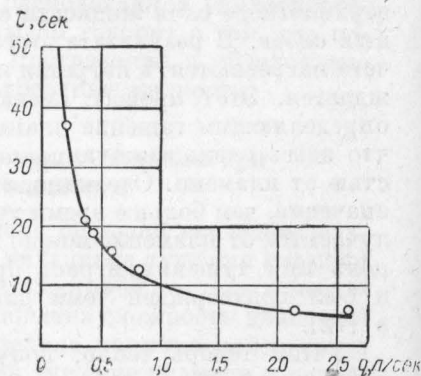


Рис. 3. Зависимость времени тушения пламени дизельного топлива от расхода воздуха при сгорании жидкости в резервуаре диаметром 80 см.

а величина q_K появилась в результате учета излучения факела. Естественно, что q_K зависит от высоты слоя жидкости, от физических свойств последней и некоторых других факторов. От целого ряда величин зависит и величина коэффициента b .

На рис. 2 и 3 приведены результаты опытов, взятые из формул [6] и [12]; линии на рисунке проведены в соответствии с формулой (5), которая значительно лучше приводит данные опытов, чем формула (7).

В табл. 2 приведены величины b и q_K , определенные из опытов, результаты которых даны на рис. 2 и 3. В табл. 2 буквой t обозначено время горения жидкости до момента начала тушения, q_K — критический расход в л/сек.

3. Так как $G = B(q) h^{-5/3}$,

$$\tau = \frac{\beta}{h^{5/3} - h_K^{5/3}}, \quad (7)$$

Таблица 2

Топливо	$2R$, см	h , см	t , мин.	ϑ_0	b	q_k
Дизельное	260	85	30	—	124	1.08
»	260	108	2	20—50	56	0.49
»	80	—	—	—	9.7	0.02
Керосин	130	130	40	26—37	42	0.35

где h_k — критическая толщина слоя. На рис. 4 линия проведена в соответствии с формулой (7), что вполне удовлетворительно согласуется с данными опыта.

4. Особый интерес представляет зависимость критического времени пробега τ_k от начальной температуры ϑ_0 . В работе [14] имеется соответствующий опытный материал, но не дано соотношение, которое этот материал описывает.

Зависимость $\tau_k(\vartheta_0)$ можно установить, определяя следующим путем. Выделим на поверхности 1 см³ перемещаемой жидкости и допустим, что он перемещается от буруна к стенке резервуара со скоростью, равной скорости течения жидкости в поверхностном слое. Если температура этого объема у стенки не будет выше критической ϑ_k , то горение жидкости прекратится.

Допустим, что взятый элемент жидкости был вынесен из глубинных слоев и имеет температуру ϑ_0 , равную начальной температуре жидкости. При перемещении объема жидкость, в нем находящаяся, будет нагреваться за счет излучения пламени и тепло- и массообмена с нижележащими слоями. Количество тепла, получаемого объемом от факела за время пробега τ , будет равно $A\sigma T^4\tau$, а количество тепла, полученного от нижележащих слоев, — $a(\bar{\vartheta}_n - \bar{\vartheta})\tau$, где a — коэффициент теплообмена; $\bar{\vartheta}_n$ — средняя температура подстилающего слоя, а $\bar{\vartheta}$ — средняя температура жидкости в выделенном объеме. Если время пробега будет равно критическому значению τ_k , то можно принять, что

$$\bar{\vartheta} = \frac{\vartheta_k + \vartheta_0}{2}$$

и

$$\bar{\vartheta}_n - \bar{\vartheta} = \bar{\vartheta}_n - \frac{\vartheta_k + \vartheta_0}{2} = \frac{1}{2} [2(\bar{\vartheta}_n - \vartheta_k) + (\vartheta_k - \vartheta_0)].$$

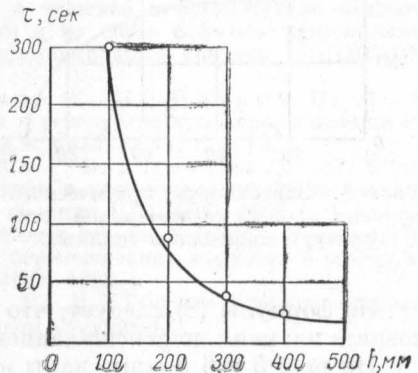


Рис. 4. Зависимость времени тупения пламени дизельного топлива от толщины слоя жидкости.

При критических условиях

$$q c (\vartheta_K - \vartheta_0) = A \varepsilon \sigma T^4 \tau_K + \frac{1}{2} a \tau_K [2 (\bar{\vartheta}_n - \vartheta_K) + (\vartheta_K - \vartheta_0)].$$

Отсюда вытекает, что

$$\tau_K = \frac{\vartheta_K - \vartheta_0}{a (\vartheta_K - \vartheta_0) + b}, \quad (8)$$

где a и b — величины, которые не зависят от ϑ_0 , но будут неодинаковы для разных жидкостей.

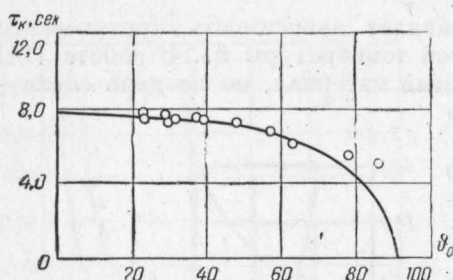


Рис. 5. Зависимость критического времени пробега от начальной температуры дизельного топлива.

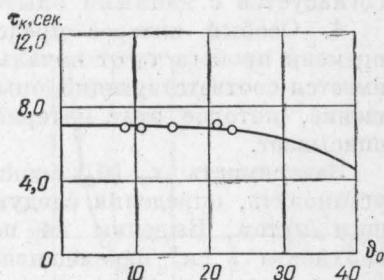


Рис. 6. Зависимость критического времени от начальной температуры керосина.

Из формулы (8) следует, что при $\vartheta_0 > \vartheta_K$ нельзя добиться гашения пламени перемешиванием.

На рис. 5 и 6 кривые даны в соответствии с последней формулой. При проведении кривой на рис. 5 величина ϑ_K была принята равной 92° , а на рис. 6 — 45° , из которых следует, что полученное соотношение хорошо описывает экспериментальные данные. Нельзя не отметить, что критическая температура оказалась выше температуры вспышки исследованных жидкостей. Этот новый результат, впервые отмеченный И. И. Петровым и В. Ч. Реуттом, представляет собой существенное уточнение сведений о критических условиях при тушении пламени жидкости перемешиванием.

Таким образом, все полученные критические соотношения удовлетворительно описывают данные опыта. Но надо заметить, что приведенные выше выводы этих соотношений являются достаточно приближенными и нуждаются в дальнейшем усовершенствовании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блинов В. И., Худяков Г. Н. и Петров И. И. О распределении температуры в нефтепродуктах, сгорающих в резервуарах. Информационный сборник ЦНИИПО, 1957.
2. Павлов П. П. и Хованова А. М. О горении нефтей и нефтепродуктов со свободной поверхности. Баку, 1955.

3. Павлов П. П. и Хованова А. М. Горение эмульсионной нефти со свободной поверхности в резервуаре. Информационный сборник ЦНИИПО, 1957.

4. Павлов П. П. и Хованова А. М. О теплопередаче в нефтепродуктах при горении их со свободной поверхности. Информационный сборник ЦНИИПО, 1954.

5. Боргойн и Кэтон. Горение нефтепродуктов в открытых резервуарах. Journal of Institute of Petroleum, vol. 33, 249, 1947.

6. Сухов Я. В. и Козлов А. В. Тушение нефтепродуктов с помощью сжатого воздуха. Отчет ЦНИИПО, 1953.

7. Блинов В. И., Худяков Г. Н. и Петров И. И. Исследование механизма тушения пламени нефтепродуктов с помощью старых и новых огнегасительных средств. Отчет Энергетического института АН СССР и ЦНИИПО, 1956.

8. Павлов П. П. и Сухов Я. В. Тушение в резервуарах нефтепродуктов путем перемешивания последних с помощью сжатого воздуха. Труды Азербайджанского индустриального института, 1956.

9. Павлов П. П. и Куликов Б. А. Тушение пожаров нефтепродуктов в подземных емкостях методом перемешивания с помощью сжатого воздуха. Информационный сборник ЦНИИПО, 1957.

10. Павлов П. П. Горение и тушение нефтепродуктов методом перемешивания тем же нефтепродуктом и их связь с физико-химическими характеристиками нефтепродукта. Информационный сборник ЦНИИПО, 1957.

11. Блинов В. И., Худяков Г. Н., Петров И. И. и Реутт В. Ч. О движении жидкости в резервуаре при перемешивании ее струей воздуха. Инженерно-физический журнал, № 11, т. I, 1958.

12. Блинов В. И., Худяков Г. Н. и Петров И. И. О механизме тушения горения нефтепродуктов в резервуарах путем перемешивания их воздухом. Информационный сборник ЦНИИПО, 1958.

13. Реутт В. Ч. Применение методов теории подобия и размерности при изучении гидродинамики процесса перемешивания жидкости в резервуарах. Информационный сборник ЦНИИПО, 1958.

14. Петров И. И., Реутт В. Ч. Тушение пламени жидких топлив перемешиванием (статья в данном сборнике).

ТУШЕНИЕ ПЛАМЕНИ ЖИДКИХ ТОПЛИВ МЕТОДОМ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

Физические основы и область применения перемешивания

Одним из новых и высокоэффективных способов тушения пожаров жидких топлив в резервуарах является метод перемешивания горячей жидкости воздухом или струями той же жидкости. Физические основы этого способа станут ясными, если рассмотрим следующий пример. В резервуаре с жидким топливом от той или иной причины происходит воспламенение паров, которое сопровождается взрывом и разрушением кровли резервуара. Возникшее в результате взрыва пламя в дальнейшем поддерживается благодаря непрерывному притоку паров со стороны жидкости и кислорода из окружающего воздуха. Интенсивность горения определяется скоростью испарения, которая в свою очередь зависит от количества тепла, поступающего со стороны пламени, и от температуры на свободной поверхности топлива.

С момента воспламенения температура на поверхности возрастает и спустя некоторое время становится равной для индивидуальных жидкостей средней температуре кипения¹. Таким образом, в первый период горения вблизи свободной поверхности образуется прогретый слой, толщина которого невелика и не превышает нескольких сантиметров. В глубинных слоях горючая жидкость остается холодной. Если насосом *А* откачивать холодную жидкость и подавать ее в этот же резервуар через трубу *Б*, конец которой направлен вверх, то струя, вытекающая из трубы, вызовет движение жидкости во всем объеме *В* (рис. 1, а). В результате движения холодные слои будут смешиваться с верхним прогретым слоем, температура которого вследствие этого резко понизится. Понижению температуры топлива будет соответствовать уменьшение скорости испарения и, следовательно, интенсивности горения. В тот момент,

¹ Температура индивидуальных жидкостей равна температуре кипения.

когда в результате перемешивания температура топлива в каждой точке свободной поверхности станет ниже температуры воспламенения,¹ горение полностью прекратится и пожар будет потушен. Тушение пламени происходит в течение 10—15 мин. с момента включения насоса.

Такова принципиальная схема тушения пожаров жидких топлив в резервуарах перемешиванием при помощи струй той

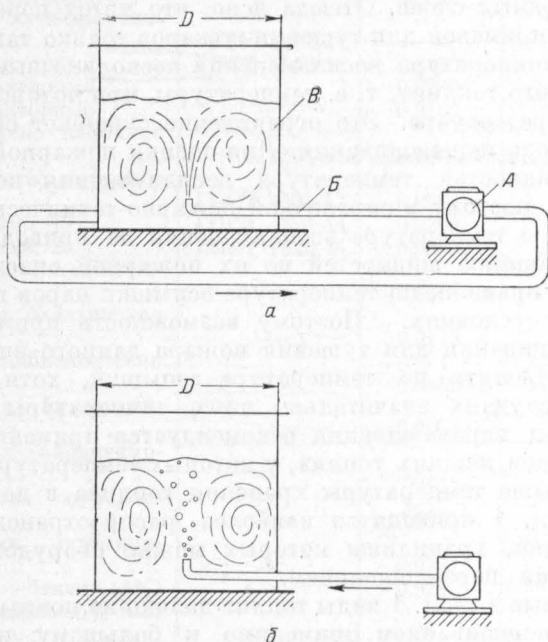


Рис. 1. Принципиальная схема тушения перемешиванием при помощи струй той же жидкости и воздухом.

же жидкости. Перемешивание может быть осуществлено любым способом, в том числе и воздухом. В этом случае воздух от какого-либо источника (компрессора или баллонной установки) подается через воздухопровод под слой топлива (рис. 1, б). Пузырьки воздуха, поднимаясь вверх, будут увлекать близлежащие слои жидкости, вызывая движение во всем объеме. Вместо воздуха может быть применен любой негорючий газ — углекислота, азот и т. п. Выбор того или иного способа перемешивания определяется технико-экономическими условиями данного объекта.

¹ Речь идет о температуре воспламенения жидкости, но не о температуре воспламенения паровоздушной смеси.

Тушение пламени наступает в тот момент, когда температура на поверхности становится ниже температуры воспламенения данного вида горючего. Охлаждение же прогретого слоя зависит от температуры холодных глубинных слоев, которая при длительном хранении топлива в резервуаре приблизительно равна температуре окружающего воздуха.

При перемешивании температура вблизи свободной поверхности снижается, но, очевидно, она не может стать ниже температуры холодных слоев. Отсюда ясно, что метод перемешивания может быть применен для тушения пожаров только таких топлив, у которых температура воспламенения несколько выше температуры холодного топлива, т. е. температуры, при которой жидкость хранится в резервуаре. Это ограничение суживает область применения метода перемешивания. Для оценки пожарной опасности горючих жидкостей температура воспламенения используется очень редко, поэтому в справочной пожарно-технической литературе данные о температуре воспламенения не приводятся.

Классификацию жидкостей по их пожарной опасности определяют, как правило, по температуре вспышки паров в известных стандартных условиях. Поэтому возможность применения метода перемешивания для тушения пожара данного вида топлива следует определять по температуре вспышки, хотя последние во многих случаях значительно ниже температуры воспламенения. Метод перемешивания рекомендуется применять для тушения пожаров жидких топлив, у которых температура вспышки несколько выше температуры хранения топлива в данных условиях. В табл. 1 приводятся наиболее распространенные виды жидких топлив, хранилища которых можно оборудовать системами тушения перемешиванием.

Приводимые в табл. 1 виды топлив далеко не полные. Тушение пожаров перемешиванием применимо к большому ряду индивидуальных жидкостей, применяемых и производимых химической промышленностью, а также к различного вида маслам и горючим смесям.

Метод перемешивания можно применять не только для противопожарной охраны хранилищ жидких топлив, но и при некоторых технологических операциях, например, при закалке крупных деталей на заводах машиностроительной промышленности. При опускании раскаленной детали в закалочную ванну не редко происходит воспламенение масла, находящегося в ванне. Тушение возникшего пожара при этом часто производят кустарными способами — пытаются закрыть ванну крышкой, либо раскисывают деталь при помощи крана с целью сбить пламя и т. п.

Эти операции в большинстве случаев приводят к большой трате времени и оказываются безуспешными. Если оборудовать ванну системой тушения, например, воздухом, то возникший пожар можно легко ликвидировать в течение нескольких минут, не нарушая хода технологической операции. Системами перемешивания могут быть оборудованы объекты нефтяной, топливной

Таблица 1

Наименование топлива	ГОСТ или ТУ	Удельный вес при 20° С	Температура вспышки, °С (по ГОСТ 1421-53)
Керосин осветительный . . .	ГОСТ 4753-49	0,8100	+48
Керосин осветительный . . .	—	0,8340	+58
Керосин сульфированный	ВТУ 467-53	—	+51
Керосин тракторный	ГОСТ 1842-52	0,8190	+28
Керосин тракторный	—	0,8230	+27
Керосин тракторный	—	0,8140	+18
Мазут — топливо нефтяное 40	ГОСТ 1501-52	0,9488	+140
Мазут — топливо нефтяное 80	ГОСТ 1501-52	0,9572	+145
Мазут флотский 12	ГОСТ 1626-44	0,9295	+158
Мазут флотский 20	ГОСТ 1626-44	0,9350	+128
Лигроин каталитический	—	0,8613	+41
Нефть сырая балаханская тяжелая	—	0,9170	+23
Нефть сырая бибиэйбатская тяжелая	—	0,8859	+27
Нефть сырая бинагадинская	—	0,9064	+18
Нефть сырая карачухурская	—	0,8742	+34
Нефть сырая сураханская	—	0,8880	+22
Нефть сырая шубанинская	—	0,9161	+26
Мазут (97%) + бензин (3%)	—	0,925	+30
Спирт метиловый 55%-ный и ниже	—	—	От +23 и выше
Спирт этиловый 70%-ный и ниже	—	—	От +22 и выше
Топливо для быстроходных дизелей зимнее ДЗ	ГОСТ 4749-49	0,8310	+78
Топливо дизельное ДА (арктическое)	ГОСТ 4749-49	0,8471	+64
Топливо для быстроходных дизелей специальное ДС	ГОСТ 4749-49	0,8440	+92
Топливо для тихоходных дизелей ДТ-1 (М ₃)	ГОСТ 1667-51	0,9168	+110
Топливо дизельное ДТ-2	ГОСТ 1667-51	0,9212	+110
Топливо дизельное авто-тракторное Л	ГОСТ 305-42	0,8670	+71
Топливо Т-1 сернистых нефтей	ВТУ 335-50	0,7780	+29
Топливо Т-1	ГОСТ 4138-49	0,8130	+28
Топливо Т-1 выщелоченное	ГОСТ 4138-49	0,8240	+31

и химической промышленности, железнодорожного, морского и авиационного транспорта.

Процесс тушения пожаров перемешиванием характеризуется тесной связью тепловых и гидродинамических факторов. Перераспределение температуры в слоях жидкости происходит благодаря движению масс топлива, вызываемому либо струей той же жидкости, либо воздухом. Время тушения определяется скоростью изменения температурного поля, которая в свою очередь зависит от структуры потока, от степени его турбулентности и т. д. Поэтому ясно, что для построения схемы расчета систем пожаротушения перемешиванием и для получения требуемых для расчета данных необходимо изучить гидродинамику перемешивания и тепловые процессы, протекающие при тушении пламени. Ниже излагаются результаты исследования этих процессов и приводится схема расчета систем пожаротушения перемешиванием с описанием конструкций этих систем.

Гидродинамика перемешивания

Основные вопросы, связанные с рассматриваемым явлением, освещены в работе [1], где приводятся данные о распределении скорости движения жидкости в резервуаре при перемешивании воздухом, при различных высотах слоя жидкости, расхода воздуха и т. д. Изучена также качественная картина движения. Фотографирование опилок, взвешенных в воде, во время их движения вместе с жидкостью дало картину, характерную для турбулентных потоков. Измерение скорости движения производилось при помощи вертушки, которая давала только среднее значение скорости в данном месте, что не позволяло судить о характере пульсации скорости и их величине.

Кроме того, в работе [1] нет данных о распределении скорости вблизи свободной поверхности жидкости, которое, как будет показано ниже, играет существенную роль в процессе тушения пламени перемешиванием топлива. Ниже излагаются результаты исследования распределения скорости потока вблизи свободной поверхности и характера потока при перемешивании.

Для измерения осредненных скоростей применялась вертушка, а для выяснения характера потока был изготовлен специальный прибор, позволяющий регистрировать изменение скорости во времени. Этот прибор состоит из датчика скорости (рис. 2) и соответствующей усилительной аппаратуры.

Датчик скорости представляет собой конструкцию, чувствительным элементом которой является проволочное сопротивление, применяемое обычно при тензометрических измерениях. Этот тензочувствительный элемент наклеен на гибкой стальной пластинке 2, которая одним концом зажата в коромысле 1, другим упирается в иглы опорного кольца 7. Коромысло может совершать небольшие колебания около оси, опирающейся на подшипники 3, которые вмонтированы в корпус датчика 4. К переднему концу

коромысла прикрепляется приемная лопаточка датчика 6. Для уравнивания коромысла с лопаточкой на нем имеется перемещающийся балансировочный грузик 5.

Чувствительность датчика при данной усилительной системе определяется жесткостью пластины 2, соотношением плеч коромысла и площадью приемной лопаточки. Для регистрации непериодических процессов чувствительность датчика соответствующим подбором указанных параметров может быть сделана довольно высокой. При измерении же в пульсирующем потоке увеличение чувствительности лимитируется необходимым соотношением частот собственных колебаний коромысла и частоты периодического процесса, — частота собственных колебаний должна быть в несколько раз больше частоты процесса. Поэтому необходимо увеличивать жесткость пластины и укорачивать плечо коромысла, на котором крепится лопаточка, т. е. выполнение правильного соотношения частот производится в ущерб чувствительности датчика. Датчик, изображенный на рис. 2, имеет равноплечее коромысло, пластинку толщиной 0,5 мм и приемную лопаточку диаметром 40 мм.

Сравнительно большой диаметр лопаточки был выбран из следующих соображений. Визуальные наблюдения движения жидкости в резервуаре с прозрачными стенками, а также непосредственные измерения при помощи вертушки показывают, что в потоке преобладают крупномасштабные пульсации, в которых,

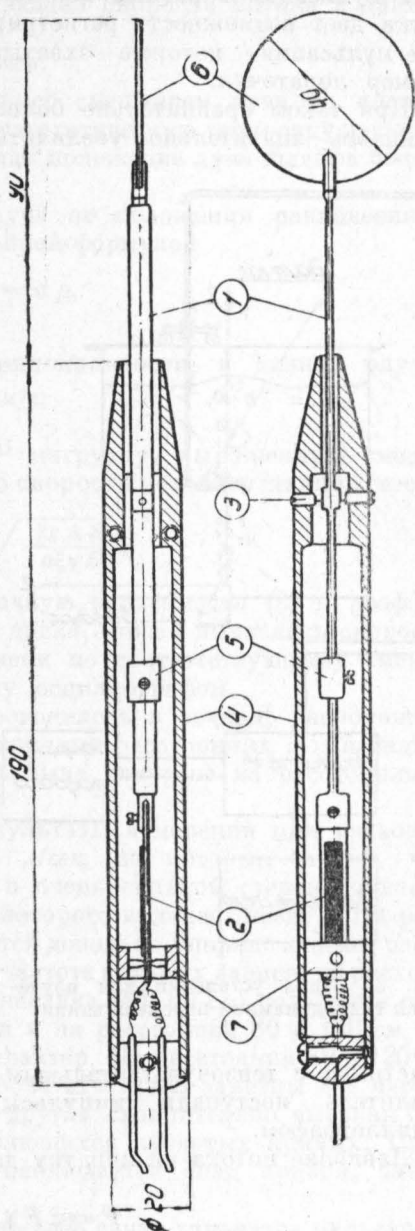


Рис. 2. Устройство тензометрического датчика скорости.

как известно, заключена наибольшая доля энергии пульсаций. Поэтому представляет большой интерес определить характер этих пульсаций в разных местах потока. Большой диаметр лопатки дает возможность регистрировать только крупномасштабные пульсации, которые охватывают области, превышающие размер лопаточки.

При таком сравнительно большом размере приемного диска пришлось значительно увеличить жесткость пластинки, что, естественно, снизило чувствительность датчика. Датчик данной конструкции позволял регистрировать скорость потока от 10—15 см/сек и выше с записью процесса на узкую пленку осциллографа МПО-2. Большая чувствительность датчика для целей данного исследования не требовалась.

Измерение скорости потока при помощи описанного датчика производилось при перемешивании дизельного топлива в резервуаре диаметром 2,6 м. Высота слоя дизельного топлива была равна 208 см; воздух подавался через насадок диаметром 26 мм, расположенный в центре дна резервуара. Схема установки показана на рис. 3.

Датчик крепился к вертикальной штанге под прямым углом, так что плоскость приемного диска была перпендикулярной к направлению движения в основном потоке. Вследствие давления потока на лопатку датчика

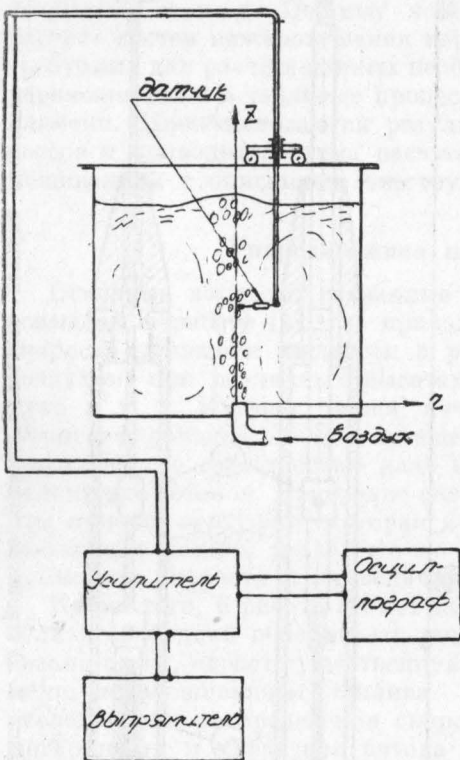


Рис. 3. Схема установки для изучения гидродинамики перемешивания.

пластинка с тензочувствительным элементом прогибалась и на усилитель поступали импульсы, которые регистрировались осциллографом.

Давление потока на лопатку датчика можно записать в виде

$$P = \xi F \gamma \frac{v_z^2}{2g}, \quad (1)$$

где ξ — коэффициент сопротивления приемного диска;
 F — площадь приемного диска;

γ — удельный вес жидкости;

v_z — вертикальная составляющая скорости потока в данном месте;

g — ускорение силы тяжести.

Давление P можно связать со смещением луча на пленке, если произвести предварительную статическую тарировку датчика, нагружая его гирьками и отмечая положение луча шлейфа осциллографа.

Связь между смещением луча от положения равновесия и нагрузкой на диск дается линейной формулой

$$\Delta S = \alpha p, \quad (2)$$

где ΔS — смещение луча;

α — коэффициент пропорциональности, в данном случае равный $1,26 \cdot 10^{-2}$ см/г;

p — нагрузка.

Подставляя в (1) вместо P нагрузку, выраженную смещением ΔS , определим составную скорости потока в данном месте:

$$v_z = \sqrt{\frac{2g \Delta S}{\alpha \xi \gamma F}}. \quad (3)$$

Зная статическую тарировочную зависимость (2) и коэффициент сопротивления круглого диска, можем вычислить скорость потока в данный момент времени по соответствующему смещению ΔS , зарегистрированному осциллографом.

Большинство измерений проводилось в точках, расположенных на вертикальной оси на различных расстояниях z от насадка. В некоторых случаях скорость была измерена на расстоянии r от вертикальной оси.

На рис. 4—8 показаны результаты измерений при расходах воздуха, равных 0,45 и 3,3 л/сек, из которых видно, что характер пульсаций скорости в очень сильной степени зависит от расстояния z от насадка, из которого вытекает воздух. На расстоянии 10, 20, 30 см наблюдаются довольно упорядоченные, регулярные колебания, амплитуда и частота которых зависят от расхода воздуха. По мере удаления от насадка (40, 60 см) колебания становятся все более хаотическими и на расстоянии 80 и 120 см теряют полностью регулярный характер. На расстоянии 80 и 120 см от насадка в колебаниях скорости отчетливо заметны две частоты — одна из них небольшая, другая сравнительно высокая. Осциллограммы имеют вид колеблющихся зубчатых кривых. Причем на некоторых участках наблюдается спад кривой, затем подъем и т. д.

Чтобы более ясно представить себе связь характера пульсаций скорости с местом положения датчика в потоке, попытаемся объяснить продвижение пузырьков воздуха в толще жидкости.

При больших скоростях истечения воздуха из насадка пузырьки образуются в результате некоторого процесса, не связанного

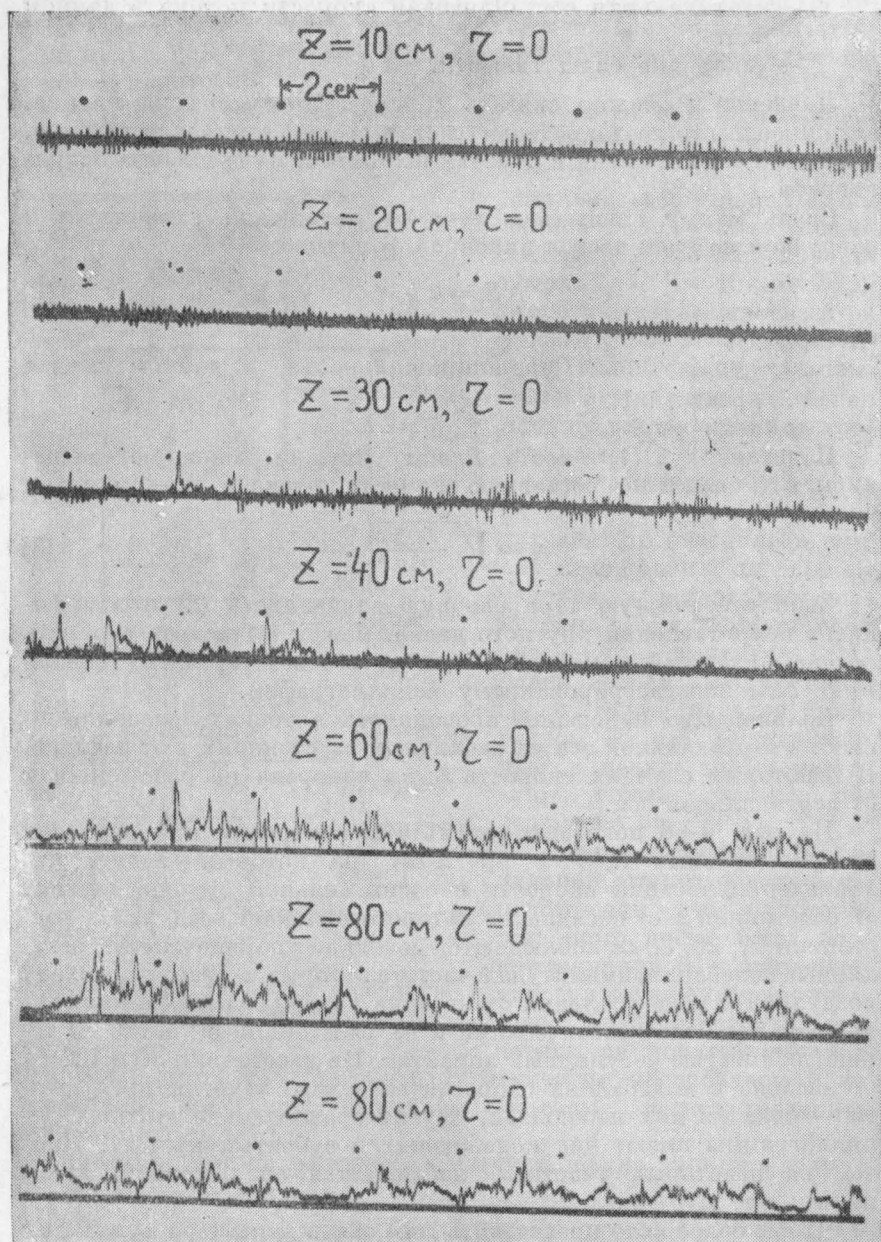


Рис. 4. Пульсации скорости при расходе воздуха 0,45 л/сек.

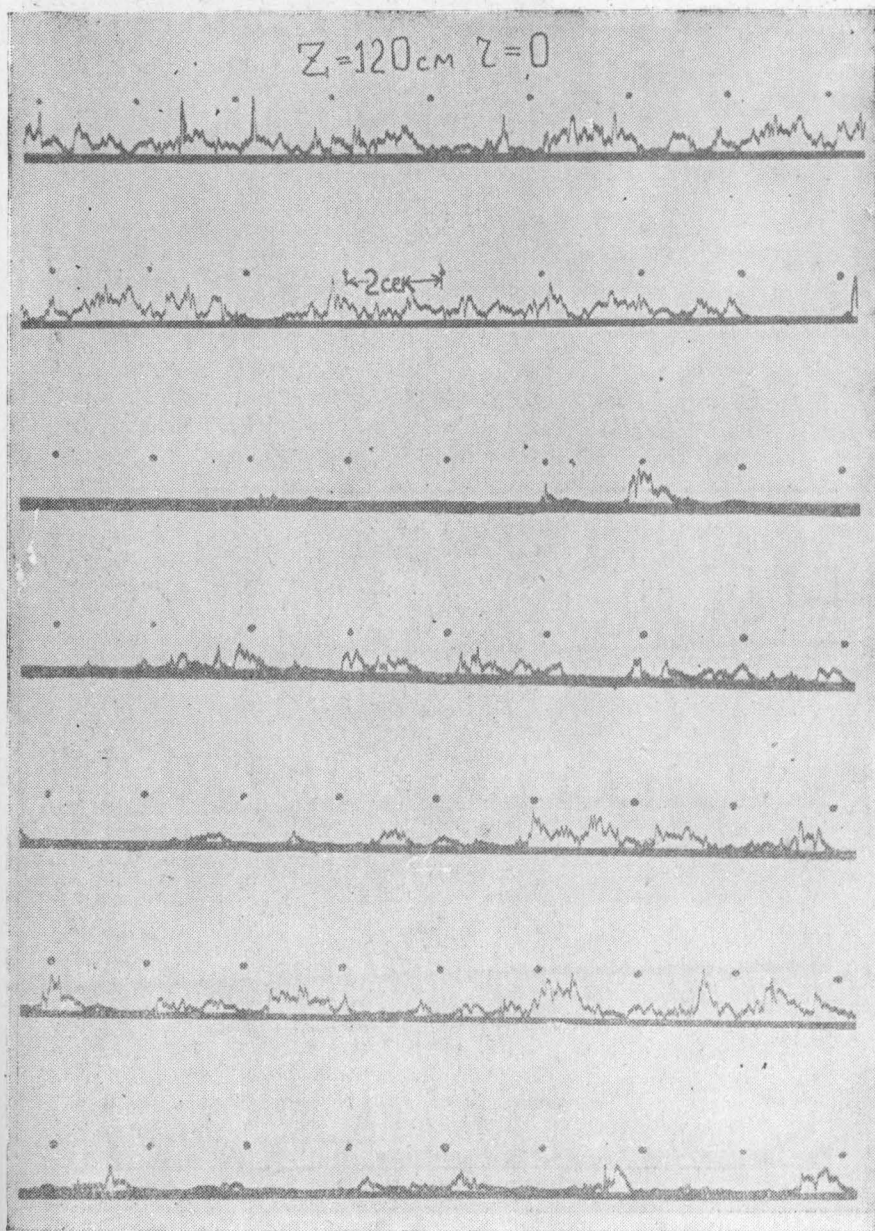


Рис. 5. Пульсации скорости при расходе $0,45 \text{ л/сек}$ на расстоянии 120 см от насадки.

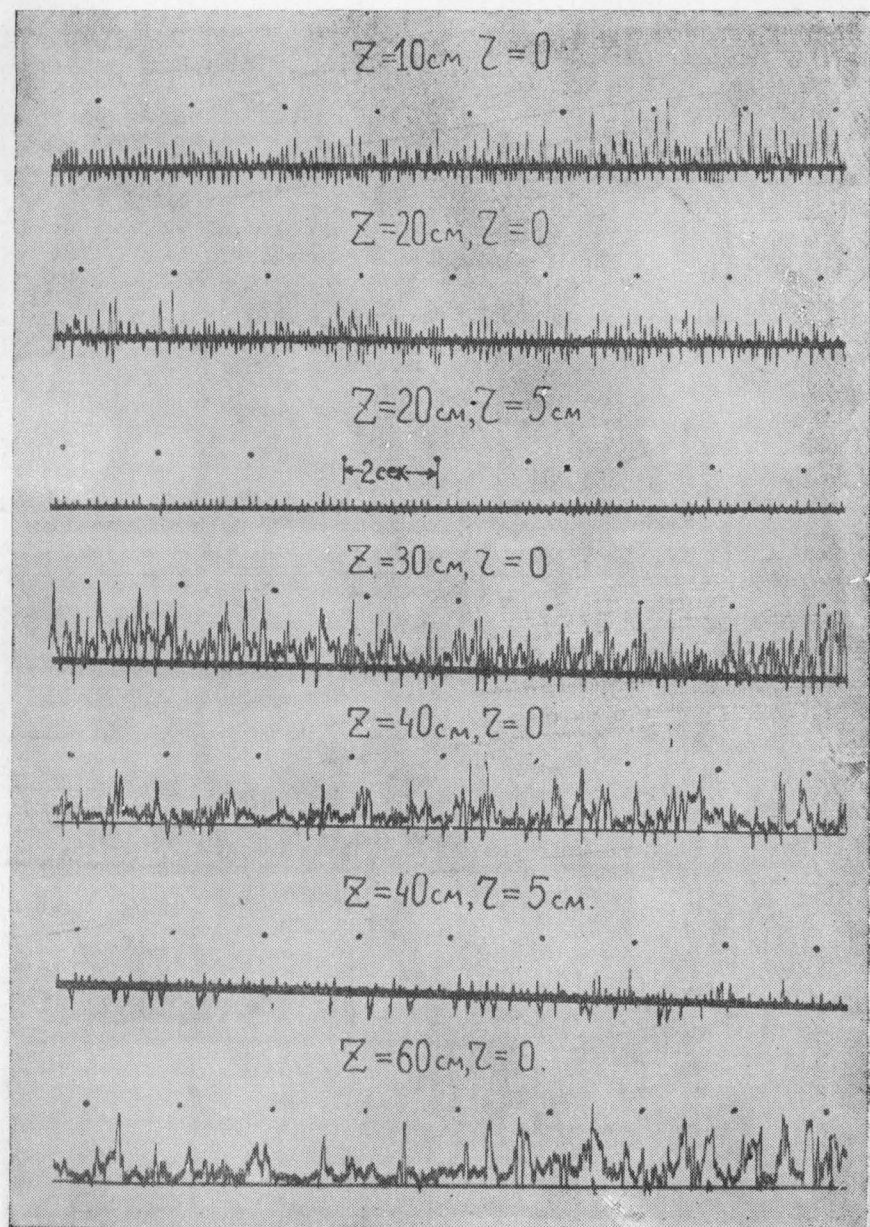


Рис. 6. Пульсации скорости в зависимости от расстояния от насадки при расходе воздуха 3,3 л/сек.

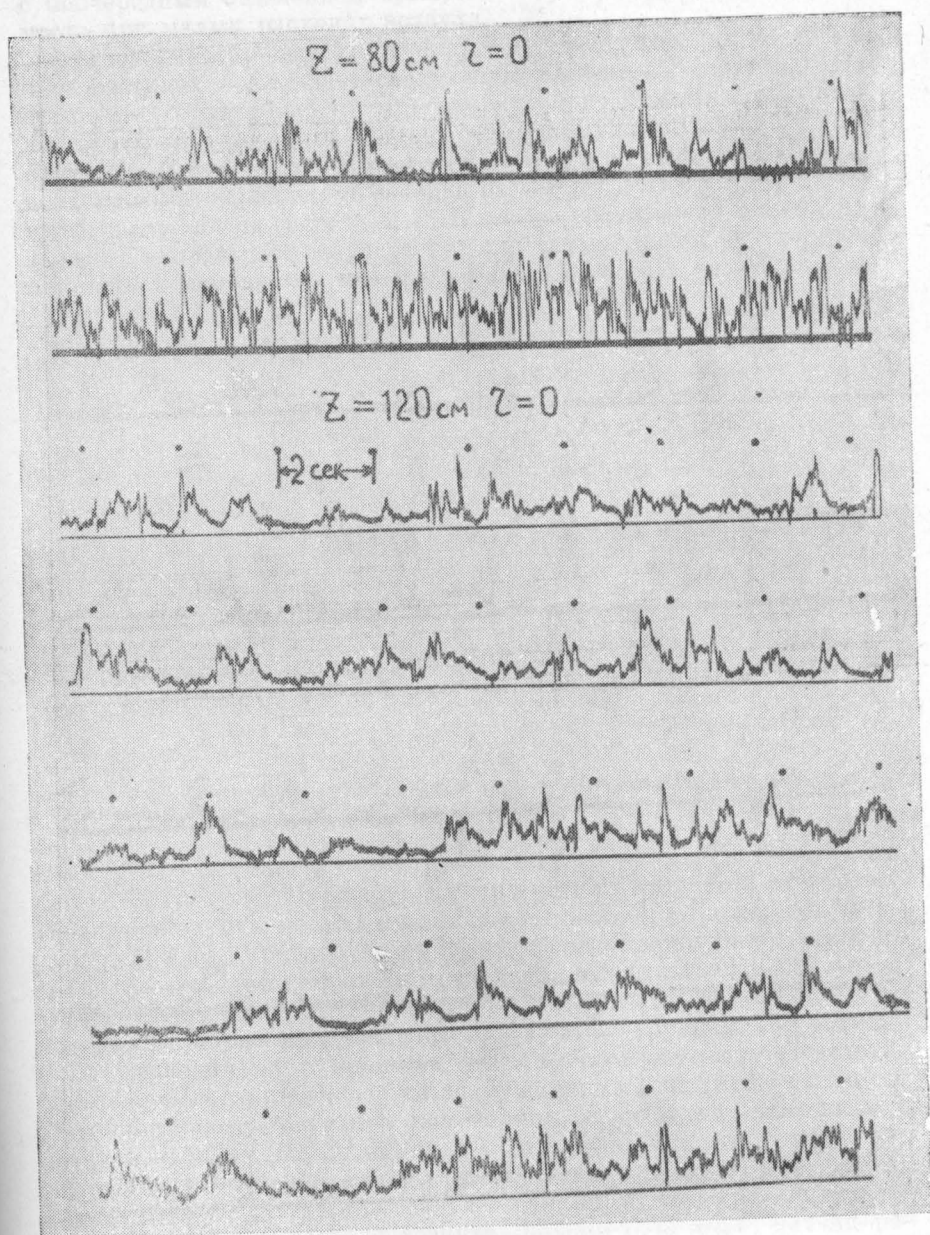


Рис. 7. Пульсации скорости в зависимости от расстояния от насадки при расходе воздуха 3,3 л/сек.

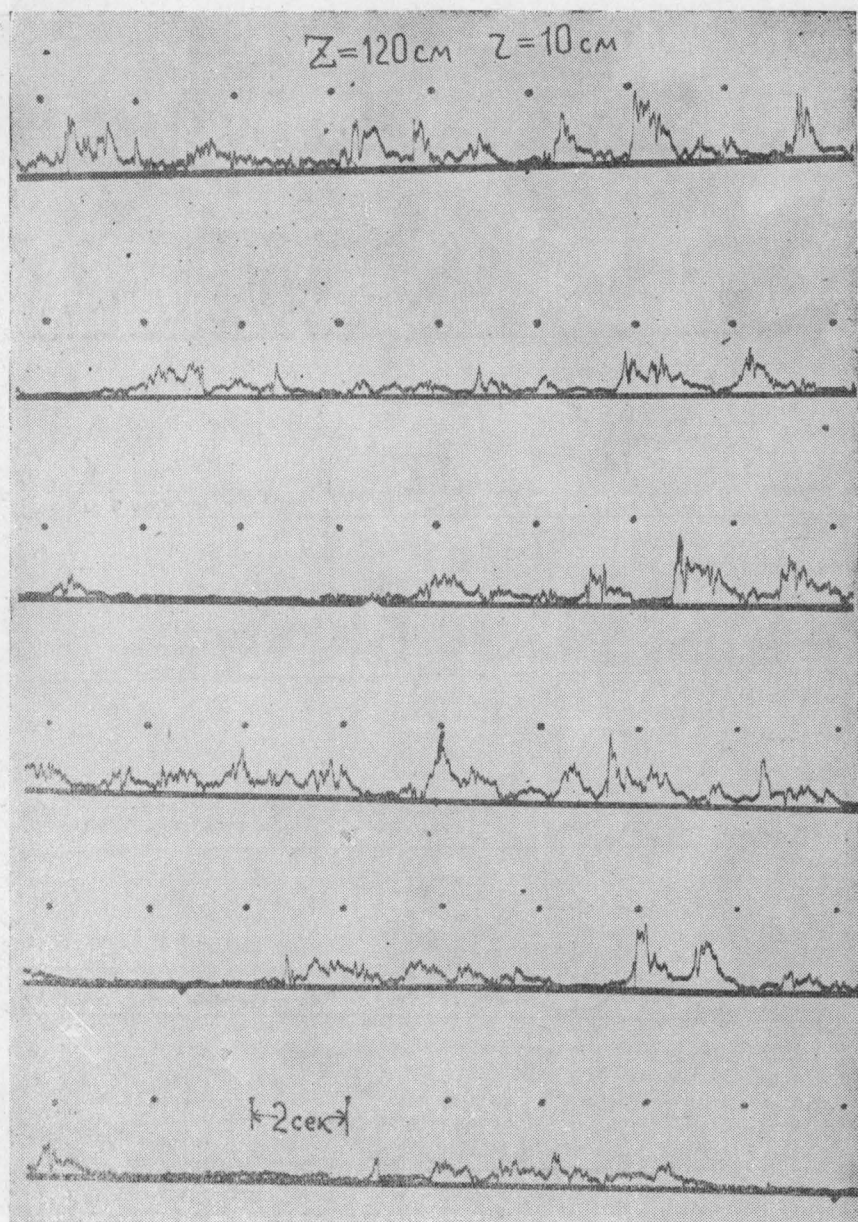


Рис. 8. Пульсации скорости при расходе воздуха 3,3 л/сек, при $z = 120\text{ см}$,
 $r = 10\text{ см}$.

с поочередным отделением пузырьков от насадка, как это имеет место при малых расходах воздуха.

Киносъемка процесса истечения воздуха из насадка при больших расходах показывает следующую картину. Вокруг насадка образуется воздушный пузырь сравнительно больших размеров, в верхний свод которого ударяет струя воздуха, образуя большое количество мелких пузырьков (рис. 9, а). С течением времени воздушный пузырь вокруг насадка растет по величине, несколько вытягиваясь вверх (рис. 9, б, в). В это же время число мелких пузырьков непрерывно возрастает и они остаются как бы прикрепленными к основному пузырю. Затем наступает такой момент,

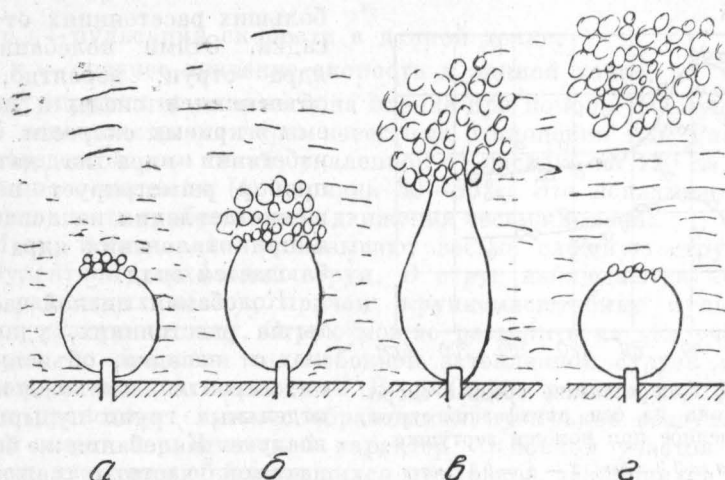


Рис. 9. Схема прорыва паров горячего сквозь слой пены.

когда сильно вытянувшийся пузырь резко отрывается от образовавшейся группы мелких пузырьков и приобретает исходную форму (рис. 9, г). В последующем процесс повторяется снова: воздушный пузырь, не отрываясь от насадка, вытягивается, образуется группа мелких пузырьков, которые отделяются, и т. д.

Таким образом, пузырьки образуются группами в результате периодического процесса, имеющего определенную частоту. Этот процесс сопровождается возмущениями в жидкости, которые воспринимаются датчиком как толчки, если датчик расположен вблизи насадка (10, 20, 30 см, см. рис. 4, 6). Частота отрыва пузырькового облака зависит от расхода воздуха, или, иначе говоря, от скорости истечения воздуха. Так, например, в рассматриваемых опытах при расходе воздуха, равном $0,45 \text{ л/сек}$, датчик регистрировал около 8 колебаний в секунду, при $3,3 \text{ л/сек}$ частота равна приблизительно 6 колебаниям в секунду, т. е. при меньших расходах частота несколько выше.

Образовавшееся пузырьковое облако при своем движении

через толщу жидкости размывается, увлекая за собой соседние слои жидкости. Непрерывная цепь следующих друг за другом групп пузырьков образует в центральной части резервуара двухфазную струю, распределение скорости в которой в поперечных сечениях, удаленных от насадка, совпадает в безразмерных координатах с распределением в свободной затопленной струе [1].

Движение в струе имеет крайне нерегулярный характер. Нерегулярность усугубляется не только неравномерным распределением пузырьков по сечению струи, но и колебаниями двухфазного ядра струи около вертикальной оси, которые особенно

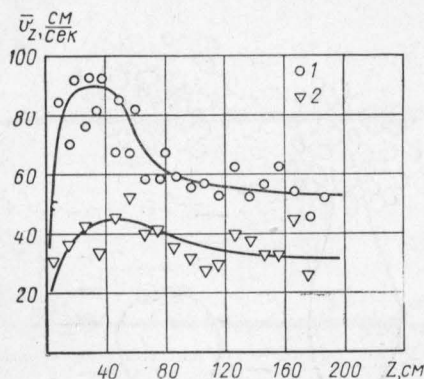


Рис. 10. Распределение средней скорости потока на оси двухфазной струи, измеренное при помощи вертушки.

1 — $q = 3,3 \text{ л/сек}$; 2 — $q = 0,45 \text{ л/сек}$.

м потока при прохождении около лопатки отдельных пузырьков, движущихся в данной группе.

На рис. 10 показано изменение скорости на оси струи в зависимости от расстояния от насадка, полученное в результате измерений с помощью вертушки при расходах воздуха, равных 0,45 и 3,3 л/сек.

На расстояниях, близких к насадку, скорость увеличивается по мере удаления от насадка, затем после некоторого максимального значения наблюдается спад, после которого скорость меняется незначительно.

Если сравнить эти кривые с результатами, полученными при помощи датчика, то оказывается, что область подъема средней скорости соответствует области регулярных колебаний, наблюдавшихся вблизи насадка и связанных с процессом образования пузырьков. Очевидно, вертушка, помещенная вблизи насадка, регистрирует в этой области регулярные толчки, давая в результате какой-то средний эффект.

Понижение средней скорости по мере удаления от насадка связано, по-видимому, с колебаниями двухфазного ядра струи около

заметны на сравнительно больших расстояниях от насадка. Этими колебаниями ядра струи, вероятно, и объясняются спады и подъемы в кривых скорости. При набегании ядра на датчик прибор регистрирует повышение давления на лопатку, а при отклонении ядра наблюдается спад.

Колебания низкой частоты на расстояниях, удаленных от насадка, объясняются, вероятно, прохождением отдельных групп пузырьков воздуха. Колебания же более высокой частоты связаны, по-видимому, с возмущениями

ее оси, а также с расширением струи, происходящим в результате турбулентного обмена количеством движения соседних слоев жидкости.

Таким образом, в двухфазной струе намечаются две области: начальный участок, где происходит образование пузырьков воздуха и который характеризуется регулярными возмущениями в жидкости, и основной участок, в котором наблюдаются весьма неупорядоченные пульсации. В рассматриваемых опытах начальный участок составлял около 80 см.

Интенсивность турбулентных пульсаций, которая определяется как отношение

$$\frac{\sqrt{\overline{v_z'^2}}}{\overline{v_z}}, \quad (4)$$

где $\overline{v_z'}$ — пульсация скорости в данной точке;

$\overline{v_z}$ — среднее значение скорости в данной точке,

можно определить по записи на пленке при помощи формулы (3), либо непосредственно через известные отклонения ΔS . Расчеты, произведенные для точки, удаленной от насадка на 120 см, дают значение отношения (4) порядка 30—50%. Это показывает, что интенсивность турбулентного движения весьма высока.

Итак, исследования показывают весьма сложную структуру турбулентной двухфазной струи. В струе наблюдаются колебания различных частот, причем крупномасштабные пульсации имеют низкую частоту. Струю можно разделить на два участка, которые по аналогии со свободной затопленной струей можно назвать начальным и основным. В начальном участке двухфазной струи происходит процесс образования пузырьков воздуха, который имеет периодический характер. Основной участок — это область движения образовавшихся пузырьков, движущихся здесь, по-видимому, группами. Интенсивность турбулентных пульсаций в основном участке весьма высока. Последнее обстоятельство весьма важно для понимания процесса перераспределения температуры при тушении пламени.

Для расчета параметров системы тушения жидких топлив перемешиванием воздухом необходимо иметь данные о зависимости средней скорости движения жидкости на свободной поверхности от расхода воздуха, высоты слоя жидкости и т. д.

Искомая зависимость должна быть определена в довольно широком интервале значений аргументов. Диаметр резервуара, например, меняется от 5 до 22,5 м. Поэтому для практического использования опытных данных последние необходимо было обобщить, привлекая методы теории подобия.

Критерии подобия для двухфазного турбулентного потока могут быть получены из уравнений Навье — Стокса, составленным для дифференциальных объемов каждой из фаз и уравнений взаимодействия фаз на границе их раздела.

Полагая процесс квазистационарным, будем иметь систему уравнений:

а) для дифференциальных объемов жидкости

$$(\vec{v}, \nabla) \vec{v} = \vec{g} - \frac{1}{\varrho} \Delta P; \quad (5)$$

$$(\nabla, \vec{v}) = 0; \quad (6)$$

б) для дифференциальных объемов воздуха с учетом подъемной силы

$$(\vec{v}'', \nabla) \vec{v}'' = \frac{\varrho'' - \varrho}{\varrho''} - \frac{1}{\varrho''} \Delta P_d''; \quad (7)$$

$$(\nabla, v'') = 0; \quad (8)$$

в) уравнения взаимодействия фаз на границе их раздела

$$P_{гр} = P_{гр}'' + \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right); \quad (9)$$

$$\varrho (\overline{v_i, v_k})_{гр} = \varrho'' (\overline{v_i'', v_k''})_{гр}; \quad (10)$$

$$v_{гр} = v_{гр}'', \quad (11)$$

В этих уравнениях:

\vec{v} — скорость;

P — давление;

\vec{g} — ускорение силы тяжести;

ϱ — плотность;

$(\overline{v_i, v_k})$ — произведения пульсационных составляющих скорости;

σ — коэффициент поверхностного натяжения;

R_1, R_2 — главные радиусы кривизны границы раздела фаз.

Величины с индексами относятся к воздуху.

В уравнениях (5), (7) члены, зависящие от молекулярной вязкости, отброшены ввиду того, что рассматриваемый поток, как было показано выше, турбулизован в достаточной степени, и можно считать силы молекулярной вязкости малыми по сравнению с кажущейся турбулентной вязкостью.

Система уравнений (5)–(11) дает следующие критерии подобия:

$$\frac{\gamma'' v''^2}{gl (\gamma - \gamma'')}, \quad \frac{\sigma}{(\gamma - \gamma'') l^2}, \quad \frac{v^2}{gl}, \quad \frac{g \Delta P}{\gamma v^2}, \quad \frac{g \Delta P}{\gamma'' v''^2}, \quad \frac{\gamma v^2}{\gamma'' v''^2}, \quad (12)$$

где γ, γ'' — удельный вес жидкости и воздуха;

l — характерный линейный размер.

В условия однозначности должны входить геометрические характеристики системы: высота слоя жидкости h , диаметр резервуара D , физические константы $\gamma, \gamma'', \sigma, g$ и расход воздуха q . Поэтому последние четыре критерия в системе (12) являются неопределяющими. Поскольку скорость воздуха в потоке опреде-

ляется в основном расходом воздуха, то естественно предположить, что

$$v'' \approx \frac{q}{l^2}, \quad (13)$$

тогда первый критерий, зависящий от скорости v'' , можно представить в виде

$$\frac{q^2 \gamma''}{gl^5 (\gamma - \gamma'')}. \quad (14)$$

Поскольку нас не интересуют перепады давления внутри потока и отношения скоростей фаз, то критерии, содержащие ΔP , и отношение скоростей могут быть отброшены. К оставшимся критериям должен быть добавлен критерий геометрических размеров системы. Если принять за определяющий размер диаметр резервуара D , то таким критерием будет отношение h/D и вся система критериев примет вид

$$\frac{v^2}{gD}, \quad \frac{q^2 \gamma''}{gD^5 (\gamma - \gamma'')}, \quad \frac{\sigma}{(\gamma - \gamma'') D^2}, \quad \frac{h}{D}. \quad (15)$$

Первый критерий (Фруда) является неопределяющим, так как в него входит неизвестная заранее скорость жидкости v . Остальные критерии определяющие, поскольку они составлены из величин, входящих в условия однозначности явления. Следует отметить, что в условия однозначности не был включен диаметр насадка, через который поступает воздух. Опыты показывают, что гидродинамические характеристики процесса перемешивания жидкости воздухом в больших резервуарах и больших высотах слоя жидкости почти не зависят от диаметра насадки или, иначе говоря, от скорости истечения воздуха. Это показывает, что условия входа воздуха под слой жидкости существенно не влияют на общую гидродинамическую обстановку, если диаметр резервуара велик по сравнению с диаметром насадка. Влияние скорости истечения воздуха становится заметным лишь при малых высотах слоя жидкости и малых диаметрах резервуара и самого насадка. Поэтому целесообразно исключить диаметр насадка из условий однозначности, считая, что интенсивность движения жидкости полностью определяется величиной расхода воздуха. Это допущение будет отвечать условиям приближенного моделирования.

Критерий Фруда целесообразно выразить через величину τ , которую при одном вводе воздуха, расположенном в центре днища резервуара, определим как

$$\tau = \frac{D}{2\bar{v}}, \quad (16)$$

где \bar{v} — средняя скорость потока на свободной поверхности.

Величина τ , очевидно, представляет время пробега некоторой вообразжаемой частицы от центра резервуара к его борту, при

движении ее со средней скоростью \bar{v} . Обозначим последние три критерия в системе (15) соответственно G , We , H , тогда критериальное уравнение должно быть выражено в форме зависимости

$$\frac{D}{g \tau^2} = f(G, We, H). \quad (17)$$

Цель опыта должна заключаться в построении этой зависимости.

Для опытов были выбраны модели резервуаров с диаметром 1,3 и 2,6 м и высотой 1,5 и 3 м соответственно. Кроме того, ряд опытов был проведен на резервуаре диаметром 22,4 м и высотой 12 м. Схема установки для измерения скорости жидкости у поверхности при помощи вертушки в этом резервуаре показана на рис. 11. Вертушка B крепилась на мачте A , которая посредством специального тросопротяжного механизма перемещалась по нижней Γ и верхней B тросовым дорожкам. Это позволяло измерять скорость потока вблизи поверхности на любом расстоянии от буруна. Число оборотов вертушки фиксировалось релейным счетчиком. Аналогичная, но более простая схема применялась и в резервуаре $D = 2,6$ м.

Наиболее характерные распределения скорости жидкости у поверхности при перемешивании воды показаны на рис. 12. Рис. 13—21 представляют результаты опытов по перемешиванию воды, керосина, дизельного топлива и смеси нефти с дизельным топливом, характеристики которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Жидкость	Удельный вес, g/cm^3	Вязкость	
		ВУ	сантипуазы
Вода	1.0	—	1.0
Керосин	0.82	—	2.06
Дизельное топливо	0.84	1,37	4.57
Смесь нефти с дизельным топливом	0.86	5.70	—

Анализ этих данных показывает, что время пробега для воды и нефтепродуктов имеет различное значение при равных условиях. Это особенно заметно при малых высотах слоя жидкости. Для нефтепродуктов время пробега одинаково при одних и тех же условиях опыта.

Наибольшее влияние на процесс перемешивания жидкости воздухом оказывают, по-видимому, разность удельных весов ($\gamma - \gamma''$) и коэффициент поверхностного натяжения, но не вязкость. Вязкость смеси нефти и дизельного топлива примерно в 4 раза больше вязкости дизельного топлива, но время пробега для этих жидкостей одинаково. Естественно, что для очень вязких

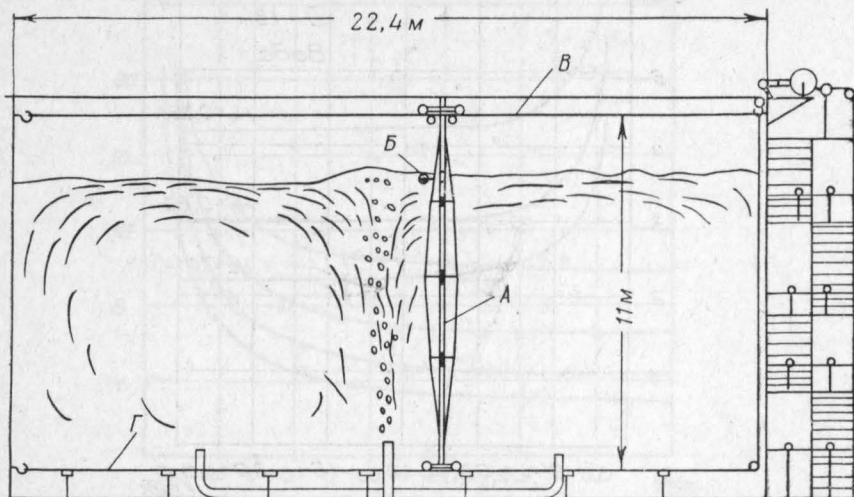


Рис. 11. Схема установки для измерения скорости потока вблизи свободной поверхности.

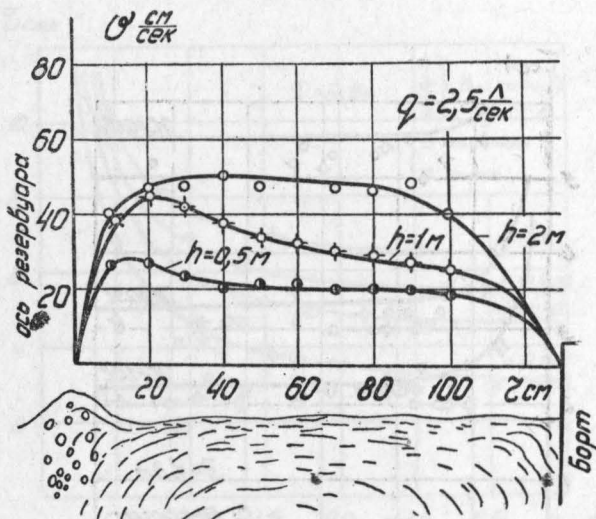


Рис. 12. Распределение скорости жидкости у свободной поверхности при перемешивании воды воздухом в резервуаре $D = 2,6$ м, v — скорость, r — расстояние от центра буруна до точки измерения; h — высота слоя жидкости над соплом.

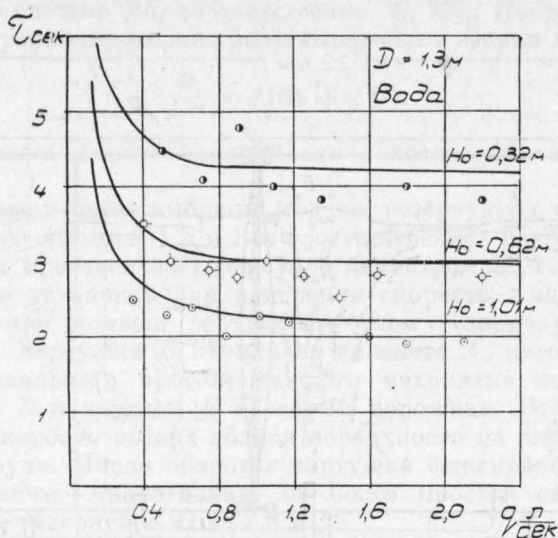


Рис. 13. Зависимость времени пробега от расхода воздуха. Вода. Резервуар $D = 1,3$ м. Ввод воздуха центральный.

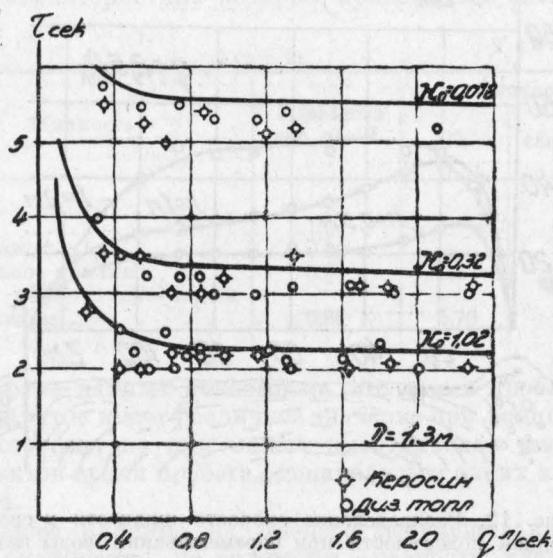


Рис. 14. Зависимость времени пробега от расхода воздуха. Керосин, дизельное топливо. Резервуар $D = 1,3$ м. Ввод воздуха центральный.

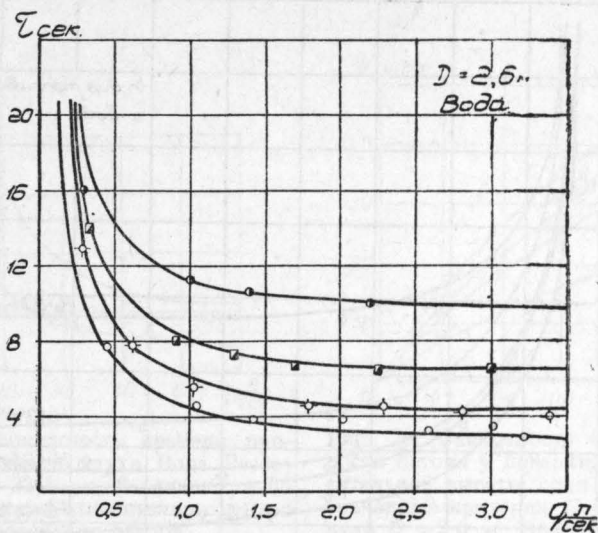


Рис. 15. Зависимость времени пробега от расхода воздуха. Вода. Резервуар $D = 2,6 \text{ м}$. Ввод воздуха центральный.

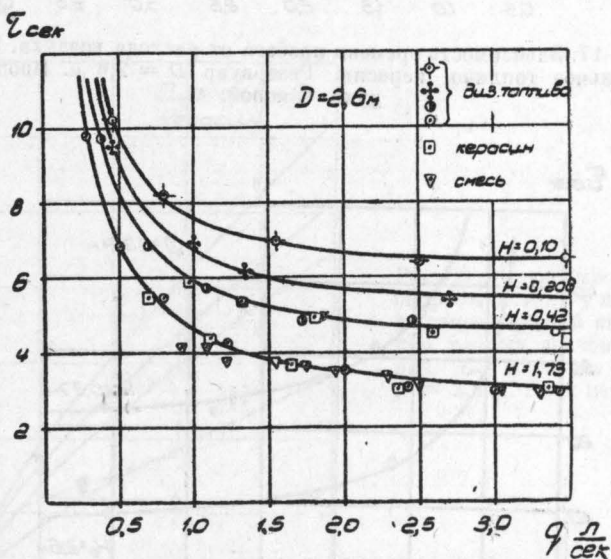


Рис. 16. Зависимость времени пробега от расхода воздуха. Дизельное топливо, керосин, смесь дизельного топлива с нефтью. Резервуар $D = 2,6 \text{ м}$. Ввод воздуха центральный.

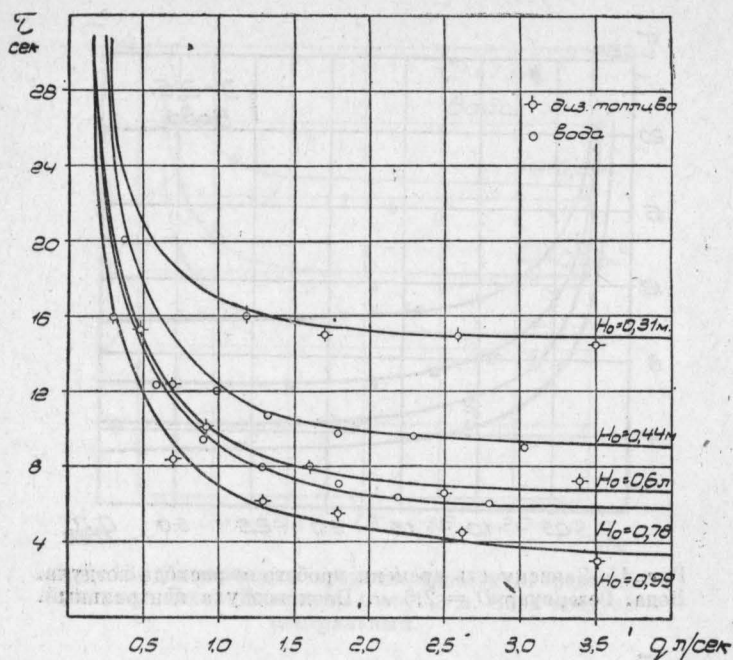


Рис. 17. Зависимость времени пробега от расхода воздуха. Вода, дизельное топливо, керосин. Резервуар $D = 2,6$ м. Ввод воздуха боковой.

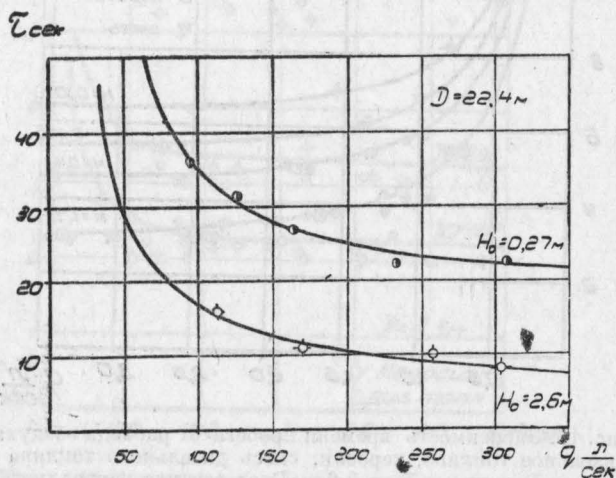


Рис. 18. Зависимость времени пробега от расхода воздуха. Вода. Резервуар $D = 22,5$ м. Ввод воздуха центральный.

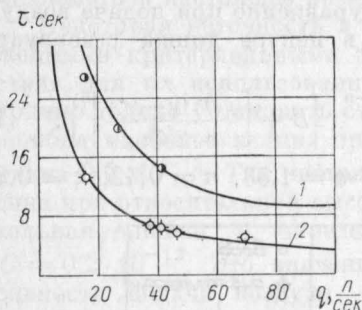


Рис. 19. Зависимость времени пробега от расхода воздуха. Вода. Резервуар $D = 22,4$ м; 6 симметрично расположенных относительно центра резервуара вводов.

1 — $H_0 = 0,93$; 2 — $H_0 = 9$.

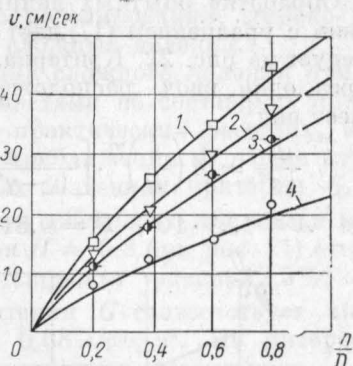


Рис. 20. Зависимость средней скорости потока у поверхности от относительной высоты слоя при разных значениях критерия G . Вода. Резервуар $D = 2,6$ м. Ввод центральный.

1 — $G = 10 \cdot 10^{-12}$; 2 — $G = 2 \cdot 10^{-12}$;
3 — $G = 1 \cdot 10^{-12}$; 4 — $G = 0,2 \cdot 10^{-12}$.

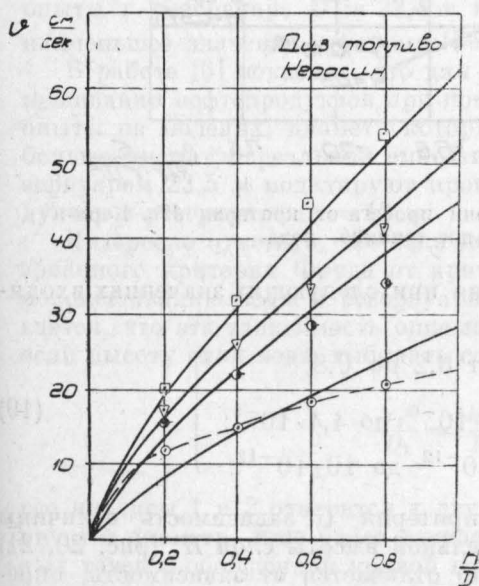


Рис. 21. Зависимость средней скорости потока у поверхности от относительной высоты слоя при разных значениях критерия G . Керосин. Резервуар $D = 2,6$ м. Ввод центральный.

жидкостей наблюдается зависимость гидродинамических характеристик от коэффициента вязкости.

Обработка опытных данных в критериях подобия в соответствии с уравнением (17) дает удовлетворительные результаты, что следует из рис. 22. Критериальное уравнение при подаче воздуха через один ввод, расположенный в центре днища резервуара, имеет вид

$$\frac{D}{g \tau^2} = A \left(\frac{h}{D} \right)^m \cdot \left[\frac{\sigma}{(\gamma - \gamma'') D^2} \right]^{-n} : \left\{ B + \left[\frac{g D^5 (\gamma - \gamma'')}{\gamma'' q^2} \right]^k \right\}, \quad (18)$$

где $A = 1,27 \cdot 10^6$, $B = 0,81 \cdot 10^{10}$, $m = 1,53$, $n = 0,42$, $k = 0,83$.

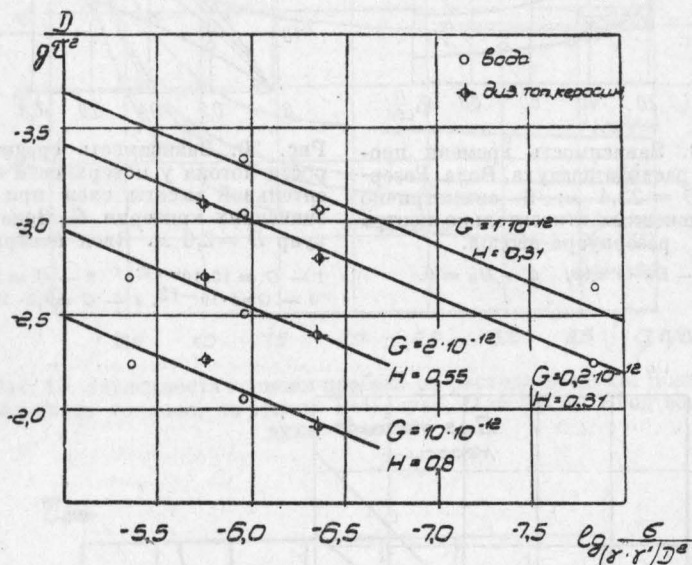


Рис. 22. Зависимость времени пробега от критерия We . Керосин, дизельное топливо, вода.

Уравнение (18) определено при следующих значениях входящих в него критериев:

$$\left. \begin{aligned} \frac{h}{D} &\text{ от } 0,2 \text{ до } 0,8; \\ We &\text{ от } 0,015 \cdot 10^{-6} \text{ до } 4,4 \cdot 10^{-6}; \\ G &\text{ от } 0,1 \cdot 10^{-12} \text{ до } 10 \cdot 10^{-12}. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

При малых значениях критерия G зависимость величины средней скорости от относительной высоты слоя H (рис. 20, 21) в действительности несколько отличается от зависимости, определяемой формулой (18). Это особенно заметно для нефтепродуктов. На рис. 21 пунктирная кривая проведена по опытным точкам, сплошные кривые — расчетные. Существующее различие объясняется тем, что при определении условий однозначности

системы не были учтены условия входа воздуха под слой жидкости; в частности, в условия однозначности не был включен диаметр насадка. Все это указывает на то, что система критериев (18) описывает условия приближенного моделирования, широко применяемого в настоящее время для сложных явлений.

Некоторая неточность в описании сложного явления приближенными критериальными зависимостями не составляет препятствия для их использования при практических расчетах, необходимо только установить степень приближения. В нашем случае ошибка наиболее велика при малых значениях критерия G , порядка $0,2 \cdot 10^{-12}$. Так, например, для дизельного топлива и керосина при относительной высоте слоя $H = 0,8$ (см. рис. 21) относительная ошибка в определении скорости равна 12,5%, если $G = 0,2 \cdot 10^{-12}$. Это значение критерия G соответствует интенсивности подачи воздуха около $0,08 \text{ л/сек м}^2$. Но интересующая нас интенсивность подачи воздуха значительно выше $0,08 \text{ л/сек м}^2$ и составляет около $0,5 \text{ л/сек м}^2$, т. е. при практических расчетах значения критерия G будут лежать в области более высоких значений, чем $0,2 \cdot 10^{-12}$, и, следовательно, ошибка в определении средней скорости будет меньше, чем 12,5%, а это вполне приемлемо для практики.

Критериальное уравнение (18) справедливо для нефтепродуктов типа керосина и дизельного топлива, перемешиваемых в резервуарах от 15 м и меньше. Это ограничение связано с тем, что опыты в резервуаре $D = 22,4 \text{ м}$ проводились с водой, так что наименьшее значение критерия We было равно $0,015 \cdot 10^{-6} *$.

В работе [6] показано, что для моделирования процесса перемешивания нефтепродуктов при помощи воды необходимо ставить опыты на моделях, диаметр которых приблизительно в 1,5 раза больше диаметра реальной емкости. Следовательно, опыты с резервуаром 22,5 м моделируют процесс перемешивания нефтепродуктов в резервуаре $D = 15 \text{ м}$.

Интересно отметить, что если построить зависимость преобразованного критерия Фруда от критерия G , используя опыты по перемешиванию воды в резервуарах 1,3; 2,6 и 22,5 м, то оказывается, что эта зависимость описывается одной кривой (рис. 23), если высоту слоя воды выбирать согласно преобразованию

$$\frac{h_1^2}{D_1} = \frac{h_2^2}{D_2}, \quad (20)$$

где индексы 1 и 2 относятся к двум резервуарам, имеющим различный диаметр. Еще более точное совпадение экспериментальных точек с обобщенной кривой получается, если в преобразова-

* Коэффициент поверхностного натяжения воды был взят равным $7,4 \cdot 10^{-2} \text{ г/см}$, керосина и дизельного топлива приблизительно $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ г/см}$.

ние (20) ввести член, зависящий от удельного веса жидкости и атмосферного давления:

$$\frac{h_1^2}{D_1} \sqrt[3]{\frac{P_0 + \gamma h_1}{P_0}} = \frac{h_2^2}{D_2} \sqrt[3]{\frac{P_0 + \gamma h_2}{P_0}}, \quad (21)$$

где γ — удельный вес жидкости;

P_0 — атмосферное давление.

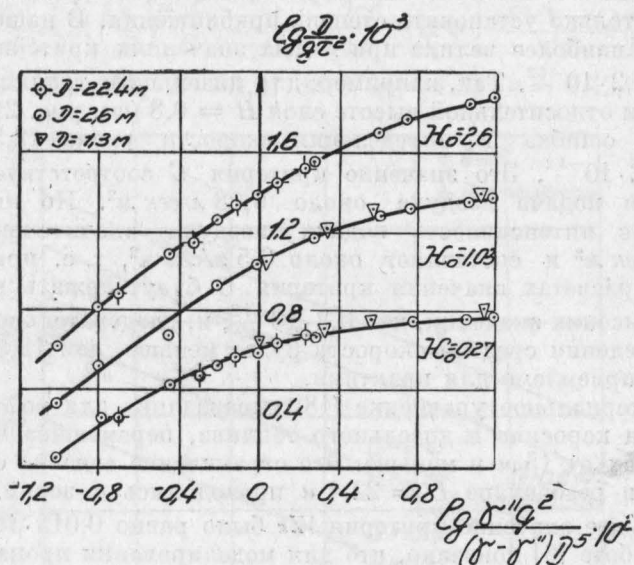


Рис. 23. Зависимость времени пробега от расхода воздуха при одинаковых значениях величин H_0 . Вода.

Введенная поправка существенно не влияет на величину отношения (20), поскольку значение корня мало отличается от единицы в пределах интересующих нас значений величины h , но, как показывают расчеты, разброс экспериментальных точек получается несколько меньшим. При построении кривых на рис. 23 использовалось это уточненное преобразование.

Эта зависимость аппроксимируется формулой

$$\frac{D}{g \tau^2} = (A + B H_0) : (C H_0^m + G^{-n}), \quad (22)$$

где H_0 — отношение (21).

Для воды коэффициенты, входящие в формулу (22), равны: $A = 0,76 \cdot 10^8$, $B = 0,97 \cdot 10^8$ 1/м, $C = 64,7 \cdot 10^8$ (м)^m, $m = 0,7$, $n = 0,83$. Для дизельного топлива и керосина аппроксимирующая функция имеет такой же вид, но коэффициенты имеют другие значения: $A = 1,16 \cdot 10^8$, $B = 0,97 \cdot 10^8$ 1/м, $C = 64,5 \cdot 10^8$ (м)^m, $m = 0,43$, $n = 0,83$.

Для резервуаров диаметром меньше 15 м формула (22) дает результаты, практически совпадающие с расчетом по формуле (18). Сплошные кривые на рис. 13, 14, 15, 16, 18 проведены в соответствии с расчетом по формуле (22), зависимость которой относится к процессу перемешивания воды и нефтепродуктов воздухом при центральной подаче последнего.

Наряду с этим исследовался также процесс перемешивания жидкости при подаче воздуха через боковой ввод. Этот способ отличается от способа подачи воздуха через центральный ввод тем, что двухфазная струя оказывается как бы прижатой к борту, вследствие чего распределение скорости как внутри жидкости, так и у свободной поверхности имеет иной характер.

При расчетах численных значений величин G и H_0 для бокового ввода в качестве определяющего размера был взят удвоенный диаметр резервуара, так как время пробега в этом случае есть время пробега жидкой частицы вдоль всего диаметра резервуара. Зависимость τ от q , h , D опять-таки может быть аппроксимирована функцией вида (22), в которой за диаметр должно быть взято его удвоенное значение, а коэффициенты равны: для воды — $A = 2 \cdot 10^8$, $B = 33,5 \cdot 10^8 \text{ 1/м}$, $C = 590 \cdot 10^8 (\text{м})^m$, $m = 2,3$, $n = 0,83$; для дизельного топлива и керосина — $A = 1 \cdot 10^8$, $B = 33,5 \cdot 10^8 \text{ 1/м}$, $C = 330 \cdot 10^8 (\text{м})^m$, $m = 2,3$, $n = 0,83$.

Процесс перемешивания, развивающийся при подаче воздуха через систему вводов, симметрично расположенных относительно центра резервуара (например, через 6 вводов, рис. 19), принципиально не отличается от процесса перемешивания при подаче воздуха через один ввод. Весь перемешиваемый объем в этом случае разбивается на ряд зон, в каждой из которых действует один ввод воздуха. Если число вводов не велико, а диаметр резервуара достаточно большой, то развитие процесса перемешивания в каждой зоне можно считать протекающим так, как если бы эта зона была изолирована от других зон твердой стенкой. Это положение подтверждается опытами по перемешиванию воды в резервуаре 22,5 м при подаче воздуха через 6 вводов. Опыты были обработаны с использованием формулы (22) с коэффициентами для центральной подачи. Кривые на рис. 19 проведены в соответствии с расчетом. Расчет для системы вводов отличается от расчета для одного ввода только тем, что вместо диаметра D необходимо брать эквивалентный диаметр $D_{\text{э}}$, который определяется диаметром зоны действия одного ввода.

Таким образом, в практических расчетах по определению времени пробега при любой системе вводов можно пользоваться формулой (22), выбрав для этого нужные коэффициенты, а также определив эквивалентный диаметр заданной системы вводов.

Перемешивание жидкости струей жидкости, вытекающей из насадка, направленного вертикально, во многом имеет сходство с процессом перемешивания жидкости воздухом. При умеренных

расходах и скорости истечения струи из насадка картина распределения скоростей жидкости в объеме и на поверхности сходна в обоих случаях. Однако это сходство лишь кинематическое, и эти два способа перемешивания принципиально различаются с точки зрения динамики явления. Если диаметр насадка мал по сравнению с диаметром резервуара, то струя жидкости в определенной части объема может рассматриваться как свободная затопленная турбулентная струя, закономерности которой достаточно хорошо изучены.

Критерии подобия в этом случае можно вывести из анализа размерности. Полагая, что в список величин, характеризующих явление, входит скорость жидкости v , диаметр резервуара D , диаметр насадка d и высота слоя жидкости h , напишем связь между множителями преобразования единиц измерения в виде

$$C_D = C_h = C_d = C_v, \quad C_v = \frac{C_e}{C_\tau}. \quad (23)$$

Отсюда получим индикаторы подобия и соответствующие им критерии подобия:

$$\frac{C_D}{C_l} = 1, \quad \frac{C_h}{C_l} = 1, \quad \frac{C_d}{C_l} = 1, \quad \frac{C_v C_\tau}{C_l} = 1; \\ \frac{D}{l}, \quad \frac{h}{l}, \quad \frac{d}{l}, \quad \frac{v \tau}{l}. \quad (24)$$

Если в качестве определяющего размера взять диаметр резервуара D , то получим три критерия подобия:

$$\frac{v \tau}{D}, \quad \frac{d}{D}, \quad \frac{h}{D}. \quad (25)$$

Время τ , входящее в первый критерий, в данном случае можно рассматривать как отношение

$$\tau = \frac{D}{v_0}, \quad (26)$$

где v_0 — скорость истечения струи из насадка. Тогда первый критерий будет представлять собой отношение скорости потока в любой точке объема к скорости истечения струи. В условия однозначности входят величины D , h , d , v_0 . Поэтому первый критерий в формуле (25) будет неопределяющим, а остальные два — определяющими. Если ввести время пробега τ , как определено в формуле (16), то искомая зависимость должна быть определена в форме функции

$$\frac{\tau v_0}{D} = f\left(\frac{d}{D}, \frac{h}{D}\right). \quad (27)$$

Опыты по определению времени пробега при перемешивании с помощью струй той же жидкости проводились в резервуарах, диаметр которых был равен 0,5; 2,6 и 22,4 м. Схема установок

для измерения скорости жидкости на поверхности была та же, что и в опытах по перемешиванию жидкости воздухом. Высота слоя жидкости над насадком менялась от $0,2D$ до $0,8D$. Время пробега определялось при разных значениях диаметра насадка и скорости истечения струи. Данные опытов представлены на рис. 24, 25, 26, где время пробега τ показано в виде зависимости от скорости истечения струи из насадка v_0 .

Как показывают опыты, время пробега при перемешивании воды, дизельного топлива и керосина одно и то же, если одинаковы остальные условия опыта. Кроме того, в пределах значений относительной высоты h/D от $0,2$ до $0,8$ величина τ слабо зависит от

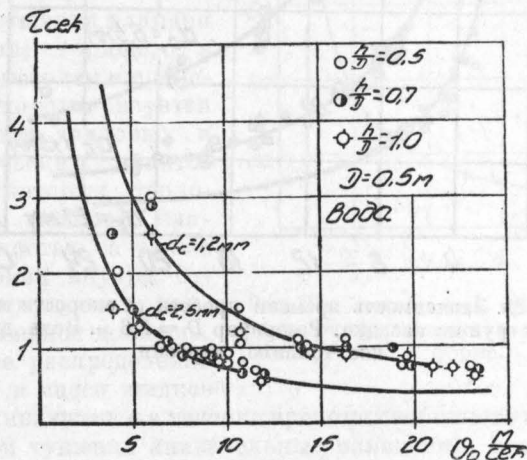


Рис. 24. Зависимость времени пробега от скорости истечения струи из насадка. Резервуар $D = 0,5$ м. Вода.

высоты слоя жидкости. Поэтому из зависимости (27) можно исключить критерий h/D .

Обобщенная зависимость времени пробега показана на рис. 27. Эта зависимость аппроксимируется функцией

$$\frac{v_0 \tau}{D} = a \frac{D}{d}, \quad (28)$$

где $a = 7,25 \cdot 10^{-2}$ — постоянное число.

Формула (28) определена при $\frac{h}{D} = 0,2 - 0,8$; $\frac{d}{D} = 1,8 \cdot 10^{-3} - 10 \cdot 10^{-3}$.

Зависимость (28) применима также и для любой системы вводов струи жидкости, если вместо диаметра D брать эквивалентный диаметр $D_э$. На рис. 26 показана зависимость времени пробега от скорости истечения v_0 при перемешивании воды в резервуаре $22,4$ м с подачей жидкости через 6 симметричных относительно

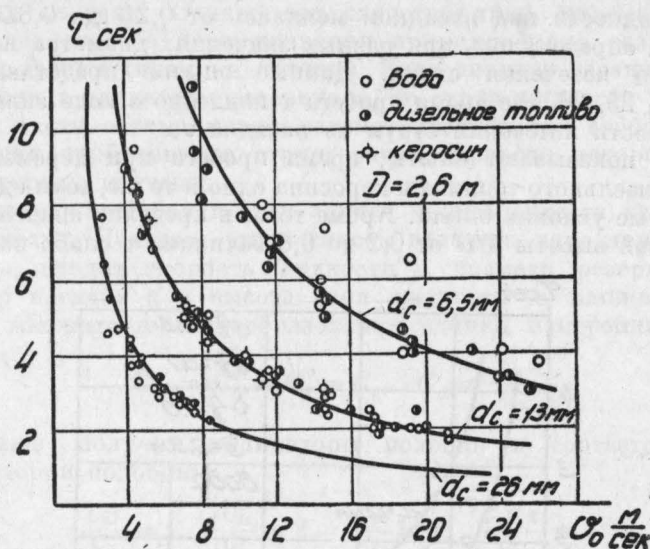


Рис. 25. Зависимость времени пробега от скорости истечения струи из насадка. Резервуар $D = 2,6$ м. Вода, дизельное топливо, керосин.

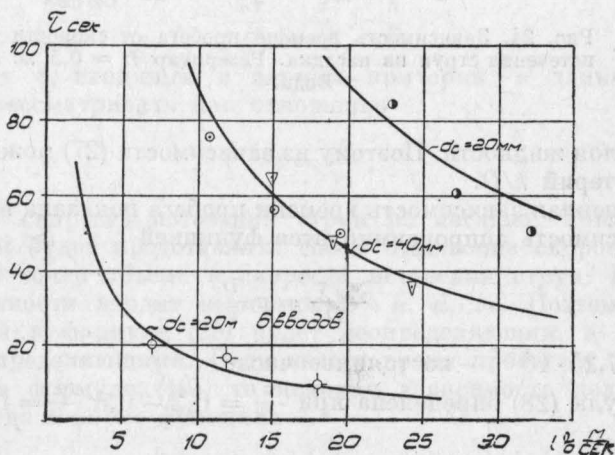


Рис. 26. Зависимость времени пробега от скорости истечения струи из насадка. Резервуар $D = 22,4$ м. Вода.

центра резервуара вводов. Сплошная кривая приведена в соответствии с расчетом по формуле (28) при $D_0 = 0,29D$. Говоря о системе вводов при перемешивании жидкости с помощью струй, имеем в виду систему «центральных» вводов, т. е. вводов, удаленных от стенки резервуара. Для расчета системы боковых вводов формулой (28) пользоваться нельзя.

Условия затухания пламени

Процесс тушения пламени нефтепродукта, горящего в резервуаре, методом перемешивания характеризуется тесной связью тепловых и гидродинамических факторов, среди которых теплообмен между факелом пламени и жидкостью, а также тепломассообмен внутри самой жидкости имеют наибольшее существенное значение.

Начальное распределение температуры в массе жидкости, устанавливающееся в течение времени свободного горения, претерпевает при тушении значительные изменения, которые приводят к тому, что к концу тушения температура жидкости становится одинаковой во всех точках объема. Следует отметить, что это конечное значение температуры определяется не только начальным распределением, но и тем количеством тепла, которое поступает от факела пламени к жидкости за время тушения.

Скорость изменения температурного поля не одинакова во всех частях системы. Как показывают опыты, в глубинных слоях жидкости температура меняется быстро и принимает значение, близкое к конечной температуре за сравнительно короткое время, соответствующее практически времени установления стационарного гидродинамического режима. Изменение температуры вблизи свободной поверхности жидкости протекает значительно медленнее, чем в глубинных слоях, что связано с более высоким начальным значением температуры в этой зоне и с излучением факела пламени, который в течение времени тушения является источником тепла.

Изменение температуры жидкости вблизи свободной поверхности имеет для всего процесса тушения в целом наиболее существенное значение, поскольку упругость паров данного вида нефтепродукта зависит в основном только от его температуры. Как только температура во всех точках поверхности станет меньше

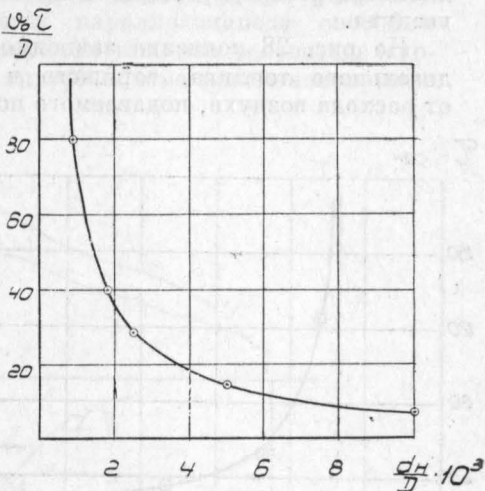


Рис. 27. Зависимость времени пробега от диаметра насадка в критериальной форме.

температуры воспламенения, так пламя над поверхностью нефтепродукта полностью погаснет.

Время тушения при перемешивании жидкости с помощью воздуха зависит от расхода воздуха, высоты слоя нефтепродукта, диаметра резервуара, времени свободного горения и числа вводов воздуха.

На рис. 28 показана зависимость времени тушения пламени дизельного топлива, горящего в резервуаре диаметром 2,6 м, от расхода воздуха, подаваемого под слой горючего через насадок,

τ_t , сек

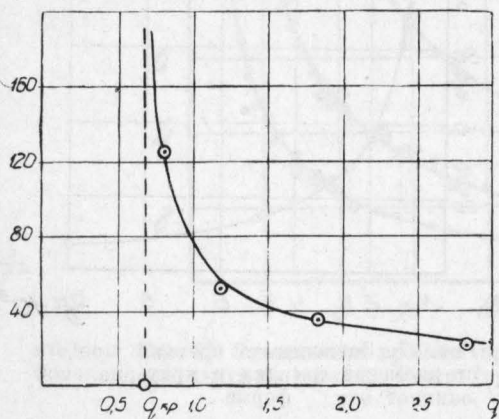


Рис. 28. Зависимость времени тушения τ_t от расхода воздуха при тушении дизельного топлива в резервуаре диаметром 2,6 м.

τ_t , сек

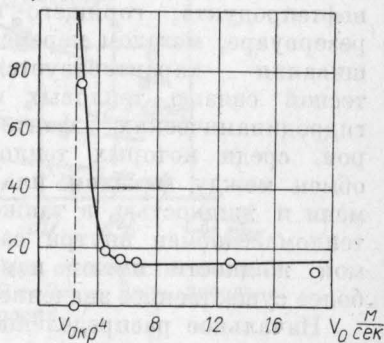


Рис. 29. Зависимость времени тушения τ_t от скорости истечения струи из насадка при тушении дизельного топлива в резервуаре 2,6 м.

расположенный в центре дна резервуара. При уменьшении расхода воздуха время тушения возрастает и при каком-то значении $q_{кр}$ становится равным бесконечности, т. е. тушение пламени не наступает. Это означает, что при приближении к некоторому минимальному для заданных условий значению $q_{кр}$ процесс становится в предельные критические условия, которые и должны по существу являться предметом исследования, если конечной целью ставится отыскание оптимальных значений параметров системы тушения перемешиванием.

При тушении перемешиванием с помощью струй той же жидкости также существуют критические условия, определяемые некоторым предельным для заданных условий значением скорости истечения струй из насадков (рис. 29).

С точки зрения явлений, происходящих вблизи свободной поверхности, критические условия соответствуют такому режиму перемешивания, когда температура жидкости при своем изменении не становится в некоторых областях поверхности ниже

температуры воспламенения. Это положение становится особенно ясным в свете следующих элементарных рассуждений.

Представим себе жесткий параллелепипед объемом dV , который движется у поверхности жидкости вдоль линии тока со скоростью, равной скорости жидкости в данной точке (рис. 30). Предположим также, что стенки параллелепипеда способны беспрепятственно пропускать жидкость так, что вследствие турбулентных пульсаций жидкость внутри объема может непрерывно

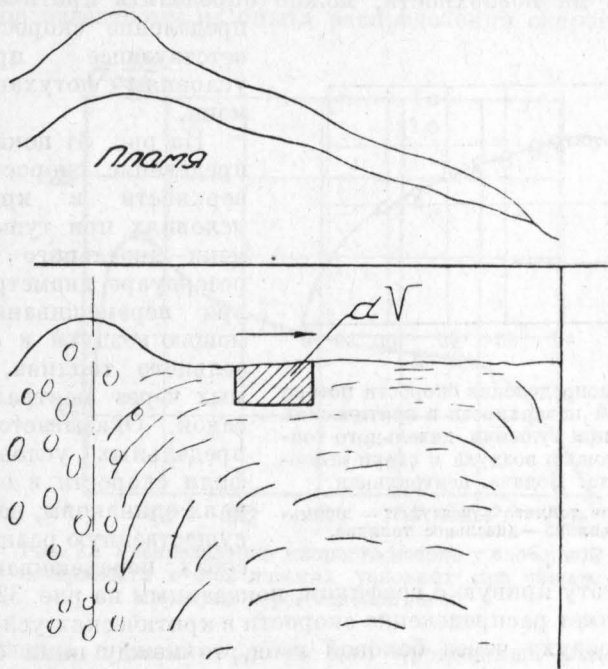


Рис. 30. Схема движения элементарного объема dV от буруна к борту резервуара.

обновляться. При движении параллелепипеда от буруна к борту резервуара жидкость, находящаяся внутри объема dV , вступает в тепломассообмен с окружающей средой, вследствие чего температура ее непрерывно меняется от какой-то начальной t_0 до некоторой конечной t_k . Величина конечной температуры зависит от того, сколько тепла поступит в объем через верхнюю грань параллелепипеда от факела пламени, от того, сколько тепла будет отведено через утопленные грани благодаря турбулентной теплопроводности, и насколько велика скорость движения объема.

Особенно важным является последнее обстоятельство, поскольку скорость перемещения параллелепипеда, иначе говоря, скорость жидкости на поверхности, относится к числу величин, легко поддающихся регулировке во время опыта. Очевидно, чем

больше скорость перемещения объема dV , тем быстрее он пройдет путь от буруна к борту резервуара, тем меньшее количество тепла он получит от факела пламени и, следовательно, тем ниже будет его конечная температура. Если скорость мала, то конечная температура может оказаться, начиная с некоторого участка пути, выше температуры воспламенения, и тогда тушение пламени не наступит. Меняя подачу воздуха или скорость истечения струи из насадка и регулируя тем самым скорость движения жидкости на поверхности, можно определить критическое рас-

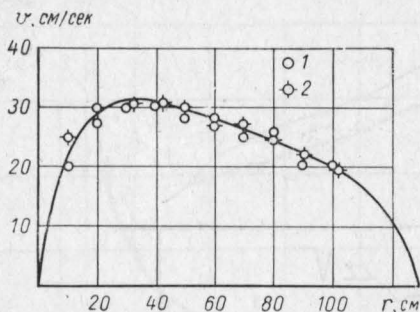


Рис. 31. Распределение скорости потока у свободной поверхности в критических условиях при тушении дизельного топлива с помощью воздуха и струи нефтепродукта. Подача центральная.

1 — дизельное топливо — воздух; 2 — дизельное топливо — дизельное топливо.

сравнить эту кривую с графиком, показанным на рис. 32, который представляет распределение скорости в критических условиях при подаче воздуха через боковой ввод, то между ними обнаруживается разница в форме и в численных значениях.

Являясь одной из характеристик критических условий, предельное распределение скорости жидкости на поверхности зависит, вообще говоря, от способа подачи воздуха или струи нефтепродукта, от числа вводов и их расположения по дну резервуара. Поэтому для характеристики критических условий целесообразно найти такую величину, зависящую от предельного распределения скорости, которая была бы инвариантна по отношению к способам подачи воздуха и струй нефтепродукта.

Такой величиной является время пробега элементарного объема dV вдоль линии тока от буруна до линии, в которой горизонтальная составляющая скорости потока обращается в нуль, что происходит в местах сопряжения зон действия отдельных вводов и у стенок резервуара. Время пробега равно

$$\tau = \frac{l}{v_{\text{п}}}, \quad (29)$$

где l — расстояние от центра буруна до места сопряжения зон действия вводов или до стенки резервуара;

$v_{\text{п}}$ — среднее значение скорости жидкости на поверхности.

Величина l определяется в соотношении с расположением вводов по днищу резервуара. Для одного ввода, находящегося в центре днища, l равно половине диаметра резервуара (см. выше). В случае одного бокового ввода путь пробега равен диаметру резервуара. Средняя скорость жидкости легко может быть вычислена по известному из опыта распределению скорости.

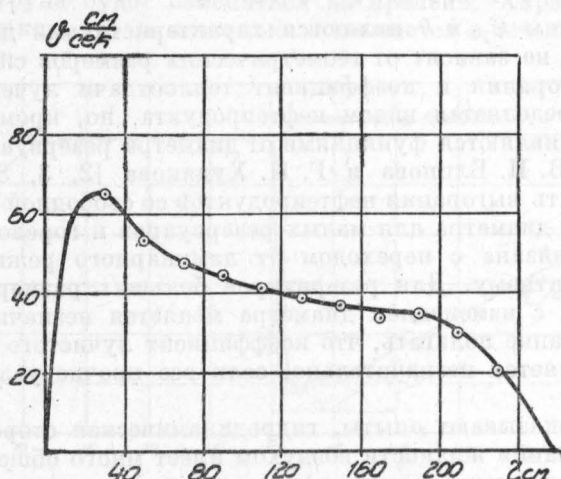


Рис. 32. Распределение скорости потока у свободной поверхности в критических условиях при подаче воздуха через боковой ввод.

Вычисление времени пробега для предельных условий, для которых распределение скорости показано на рис. 31 и 32, дает время, равное 7 сек., во всех трех случаях. Это показывает, что критические условия потухания пламени удобно описывать, прибегая к величине времени пробега $\tau_{\text{кр}}$, которая одинакова по численному значению при разных способах расположения вводов, если, конечно, другие условия одинаковы.

Вводя в рассмотрение величину времени пробега τ и его критическое значение $\tau_{\text{кр}}$, следует отметить, что эти величины имеют различный физический смысл. Величина τ является, как было показано выше, чисто гидродинамической характеристикой, зависящей в случае перемешивания с помощью воздуха от расхода воздуха, диаметра резервуара, высоты слоя жидкости и от числа вводов. При перемешивании струями нефтепродукта τ определяется скоростью истечения струи из насадка, диаметром насадка, диаметром резервуара, высотой слоя жидкости и числом вводов. Критическое же значение времени пробега зависит от теплофизических и гидродинамических параметров процесса

тушения и отражает связь между этими характеристиками в критических условиях потухания пламени:

$$\tau_{кр} = f(C_p, \kappa, \theta, t_0, \alpha_{л}, \lambda_{т}), \quad (30)$$

где C_p — теплоемкость нефтепродукта;
 κ — скорость выгорания со свободной поверхности;
 θ — теплота парообразования;
 $\alpha_{л}$ — коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием;
 $\lambda_{т}$ — коэффициент турбулентной теплопроводности;
 t_0 — температура нефтепродукта.

Величины C_p и θ являются характеристиками данного вида топлива и не зависят от геометрических размеров системы¹. Скорость выгорания и коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием также определяется видом нефтепродукта, но, кроме этого, эти величины являются функциями от диаметра резервуара. Исследованиями В. И. Блинова и Г. Н. Худякова [2, 3, 8] доказано, что скорость выгорания нефтепродуктов со свободной поверхности зависит от диаметра для малых резервуаров и горелок. Эта зависимость связана с переходом от ламинарного режима горения к турбулентному. Для резервуаров больших размеров скорость выгорания с изменением диаметра меняется незначительно. Это дает основание полагать, что коэффициент лучистого теплообмена также меняется незначительно, если все прочие условия одинаковы.

Как показывают опыты, гидродинамическая сторона явления перемешивания жидкости воздухом имеет много общего с процессом перемешивания струей нефтепродукта, несмотря на существенную разницу в отношении движущих сил. Картина распределения скорости жидкости в занимаемом ею объеме в обоих случаях сходна. Что касается скоростей жидкости на поверхности, то они даже по численному значению одного порядка. Поэтому естественно предположить, что коэффициент турбулентной теплопроводности $\lambda_{т}$, зависящий от структуры потока и степени его турбулентности, будет один и тот же как при перемешивании воздухом, так и при перемешивании струей в резервуарах одного и того же диаметра. Эта предпосылка подтверждается опытами. Равенство критического значения времени пробега при двух способах перемешивания, указанных выше, — прямое доказательство этого.

Итак, резюмируя сказанное, можно полагать критическое время пробега зависящим только от температуры нефтепродукта для данного его вида и диаметра резервуара:

$$\tau_{кр} = f(t_0, D). \quad (31)$$

Необходимо дать определение величине t_0 . Выше мы рассматривали движение элементарного жидкого параллелепипеда от

¹ Полагаем, что для резервуаров сравнительно большого диаметра температура воспламенения одинакова при прочих равных условиях.

центра буруна к борту резервуара. Повышение температуры объема dV , происходящее на пути его движения, будет зависеть от его начальной температуры, температуры, которую имеет объем в районе буруна. Следовательно, при определении критического значения времени пробега в качестве величины t_0 следует брать температуру жидкости в районе буруна. Очевидно, что вследствие начального распределения температуры в жидкости, которое устанавливается за время свободного горения, а также вследствие притока тепла от факела пламени во время тушения температура в районе буруна будет изменяться во времени. Характер этого изменения таков, что t_0 несколько повышается в течение времени

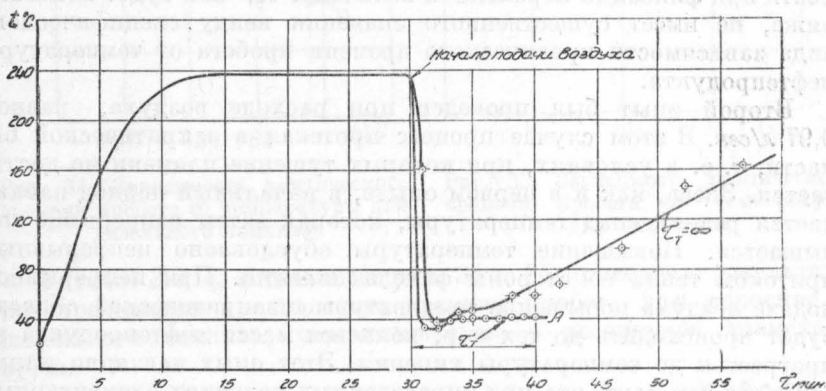


Рис. 33. Изменение температуры t_0 в течение времени тушения.

тушения и к концу тушения становится равной конечной температуре тушения. Степень этой зависимости можно установить, измеряя температуру жидкости в районе буруна в опытах, имеющих различную продолжительность.

На рис. 33 показаны результаты двух опытов, проведенных на резервуаре диаметром 2,6 м при тушении дизельного топлива воздухом, подаваемым через центральный ввод. По оси ординат отложена температура дизельного топлива в районе буруна, а по оси абсцисс — время. Температура фиксировалась от момента поджога до конца тушения. В обоих случаях температура нефтепродукта до опыта была равна 20°, высота слоя жидкости 0,85 м и время свободного горения составляло 30 мин.

В первом опыте (кривая А) воздух подавался в количестве 1,45 л/сек, что соответствовало докритической области тушения. В первый период температура в зоне буруна резко падает до 32°. Это падение обусловлено изменением начального распределения температуры и происходит за промежуток времени, практически равный времени установления стационарного гидродинамического режима. Самая низкая температура в этот начальный период (в рассматриваемом примере 32°) суть начальная темпера-

тура t_0 . В течение времени тушения, которое в первом опыте равно 10 мин., температура в районе буруна несколько повышается и к концу тушения становится равной 38° . Следовательно, повышение температуры t_0 в этом опыте равно 6° . Следует отметить, что этот опыт проведен в довольно жестких условиях: малая высота слоя горючего, длительное время свободного горения и тушения, что обеспечивает наибольшее повышение величины t_0 . Несмотря на это, разность между конечным и начальным значением температуры t_0 сравнительно невелика. Это обстоятельство дает возможность при определении зависимости [3] считать t_0 приближенно равной конечной температуре тушения. Эта неопределенность при фиксации переменной величины t_0 , как будет показано ниже, не имеет существенного значения ввиду специфического вида зависимости критического времени пробега от температуры нефтепродукта.

Второй опыт был проведен при расходе воздуха, равном 0,97 л/сек. В этом случае процесс протекал в закритической области, т. е. в условиях, при которых тушение пламени не достигается. Здесь, как и в первом опыте, в начальный период наблюдается резкий спад температуры, которая затем непрерывно повышается. Повышение температуры обусловлено непрерывным притоком тепла со стороны факела пламени. При непрерывной подаче воздуха повышение температуры в закритической области будет происходить до тех пор, пока вся масса нефтепродукта не прогреется до температуры кипения. Этот опыт наглядно иллюстрирует тот факт, что при определенных условиях элементарный объем жидкости dV ,двигающийся вдоль линии тока со средней скоростью, меньшей, чем некоторое ее критическое значение, будет нагреваться до температуры воспламенения и выше.

Зависимость критического времени пробега от температуры может быть определена опытным путем. Измеряя время тушения при разных расходах воздуха или скорости истечения жидкости из насадка и строя кривые типа рис. 28 и 29, можно найти крити-

Таблица 3

Тушение перемешиванием при помощи воздуха

Высота слоя жидко- сти, м	Критическое значение расхода воздуха, л/сек	Темпера- тура, $^\circ\text{C}$	Критическое значение времени пробега, сек.	Топливо и способ подачи воздуха
2.08	0.34	29	7.2	Дизельное топливо, центральный ввод
1.54	0.54	39	7.5	
2.34	0.77	31	7.6	Дизельное топливо, боковой ввод
1.76	1.00	22	7.8	
2.08	0.40	15	7.0	Керосин, центральный ввод
1.30	0.65	9	7.0	

ческие значения расхода воздуха или скорости истечения, при которых впоследствии в опытах без горения измерить распределение скорости на поверхности жидкости, а затем, пользуясь формулой (29), вычислить критическое время пробега.

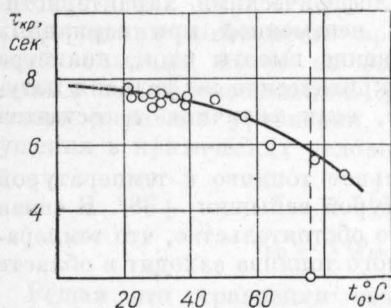


Рис. 34. Зависимость критического времени пробега от температуры для дизельного топлива.

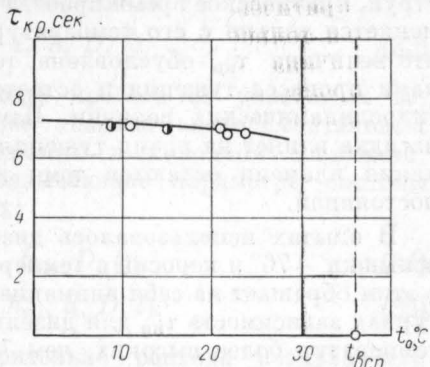


Рис. 35. Зависимость критического времени пробега от температуры для керосина.

В табл. 3 и 4, а также на рис. 34 и 35 приведены результаты по определению критического времени пробега для керосина и дизельного топлива, перемешиваемые в резервуаре диаметром 2,6 м.

Таблица 4
Тушение перемешиванием при помощи струи нефтепродукта

Диаметр насадка, мм	Высота слоя жидкости, м	Критическая скорость истечения, м/сек	Температура, °С	Критическое время пробега, сек.	Топливо и способ подачи струи
26	2,08	2,5	23	7,5	Дизельное топливо, центральный ввод
	1,56	2,5	31	7,5	
	1,04	2,4	29	7,7	
13	2,08	5,0	37	7,5	
	2,08	5,0	30	7,5	
	2,00	5,2	37	7,3	
	1,96	5,2	48	7,3	
	1,95	5,5	57	6,9	
	1,91	6,3	63	6,0	
	1,71	6,8	78	5,5	
	1,69	7,4	87	5,1	
13	2,13	5,4	21	7,0	Керосин, центральный ввод
	2,00	5,4	11	7,0	
	1,97	5,5	23	6,8	
	1,91	5,4	21	7,0	

Анализ этих данных показывает, что величина $\tau_{кр}$ не зависит от способа перемешивания. При различных высотах слоя нефтепродукта и диаметрах насадка, которым соответствуют различные значения предельного расхода воздуха и скорости истечения струи, критическое время пробега для данного вида нефтепродукта меняется только с его температурой. Это свидетельствует о том, что величина $\tau_{кр}$ обусловлена теплофизическими характеристиками процесса тушения и остается неизменной при вариациях гидродинамических величин. Изменение высоты слоя, диаметра насадка влияет на время тушения, критические же условия потухания пламени остаются теми же, если величина t_0 остается постоянной.

В опытах использовалось дизельное топливо с температурой вспышки $+76^\circ$ и керосин с температурой вспышки $+38^\circ$. В связи с этим обращает на себя внимание то обстоятельство, что температурная зависимость $\tau_{кр}$ для дизельного топлива заходит в область температур более высоких, чем 76° .

В литературе [5] сказано, что тушение методом перемешивания возможно лишь в том случае, если температура нефтепродукта не превышает температуру вспышки. Однако это не совсем точно. Тушение возможно и при температурах более высоких, чем температура вспышки, о чем свидетельствуют опыты по тушению дизельного топлива с температурой вспышки $+76^\circ$, имеющего температуру 78 и 87° (см. рис. 34). При этом было получено значение $\tau_{кр}$, отличное от нуля. Это объясняется тем, что для процесса тушения характерна не температура вспышки, а, по-видимому, температура воспламенения, которая, как известно, несколько выше температуры вспышки [4]. Критическое время пробега обращается в нуль при приближении величины t_0 к температуре воспламенения. Причем, характер кривой таков, что в сравнительно широком интервале значений температуры время пробега изменяется слабо, что сглаживает ошибку в определении t_0 , о чем шла речь выше.

Как уже указывалось, при оценке пожарной опасности жидкостей температура воспламенения используется редко, поэтому при практической оценке возможности применения метода перемешивания целесообразно, как это и было принято, ориентироваться на температуру вспышки.

На основе данных по критическим условиям потухания пламени нефтепродукта при его перемешивании становится возможным сформулировать метод расчета параметров системы тушения перемешиванием.

Согласно определению критического времени пробега тушение нефтепродукта возможно лишь в случае, когда время пробега, устанавливающееся в процессе перемешивания в соответствии с данными условиями, будет меньше его критического значения. Иначе говоря, условие потухания пламени можно записать в виде неравенств:

при перемешивании воздухом

$$\tau_{кр} > \tau(q, D, h, l); \quad (32)$$

при перемешивании струями нефтепродукта

$$\tau_{кр} > \tau(v_0, d, h, D, l). \quad (33)$$

Определив зависимость времени пробега от указанных величин опытным путем на основе анализа экспериментальных данных по перемешиванию жидкости в холодном состоянии, можно составить уравнения, связывающие параметры системы тушения в критических условиях:

$$\tau_{кр} = \tau(q_{кр}, h_{кр}, D, l); \quad (34)$$

$$\tau_{кр} = \tau(v_{окр}, h_{кр}, d, D, l). \quad (35)$$

Решая эти уравнения относительно расхода воздуха или скорости истечения струй из насадков, можно построить «область тушения» пламени нефтепродукта в зависимости от $h_{кр}$ для заданных величин D, l, d , а отсюда найти оптимальные значения величин q, v_0 .

Конструкции систем тушения перемешиванием и их расчет

Системы тушения перемешиванием при помощи воздуха могут быть стационарными или полустационарными. Стационарная система включает в себя компрессор, систему воздухопроводов и систему вводов воздуха в резервуар. Принципиальная схема такой системы показана на рис. 1, а. Полустационарная система включает в себя только вводы воздуха в резервуар. В качестве источника воздуха при этом могут служить передвижные компрессоры, передвижные баллонные установки и т. п. Вместо воздуха может быть использован любой инертный газ, например, углекислота, азот.

Система тушения перемешиванием струями того же нефтепродукта может быть только стационарной (см. рис. 1, б). Этот способ перемешивания рассчитан на использование во время тушения технологических насосов и существующей системы трубопроводов данного объекта.

Рекомендуемые схемы вводов воздуха показаны на рис. 36. Расстояние конца ввода от борта резервуара должно быть порядка 500—100 мм. Высота ввода над дном 200—500 мм. Вводы выполняют из обычных газовых труб, диаметр которых выбирается в зависимости от расхода воздуха (см. ниже). Прокладка воздушных линий от компрессора к резервуару может быть осуществлена любым способом в зависимости от условий. Для полустационарных систем тушения воздухом не требуется прокладки воздухопроводов и установки компрессора. Резервуар оборудуется только вводами воздуха по предлагаемым схемам. Причем

вводы воздуха могут представлять собой патрубки с вентилями на крышках нижних смотровых люков, на нагнетательных и спускных трубопроводах. Для этой цели можно также приспособлять любые вводы в нижней части резервуара, соблюдая по возможности симметричное расположение вводов по периметру

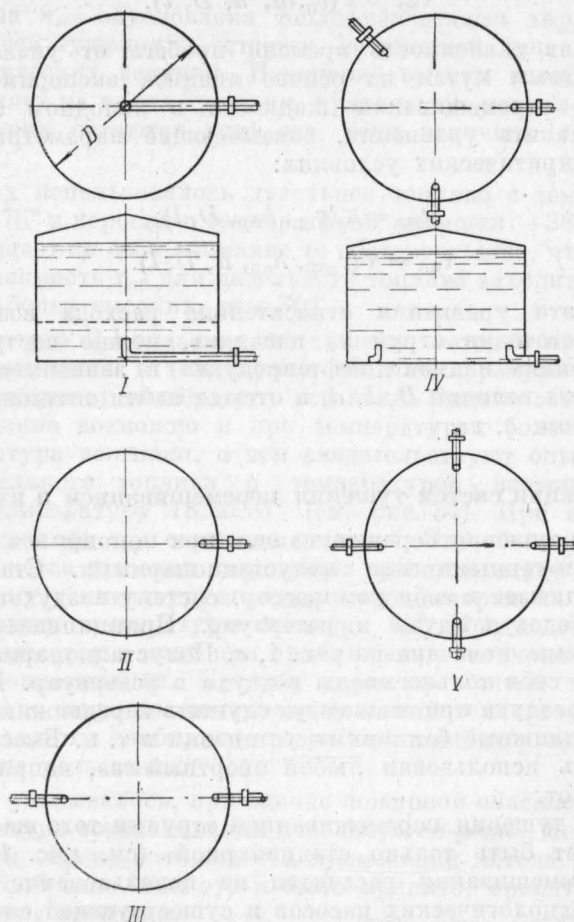


Рис. 36. Рекомендуемые системы вводов для перемешивания воздухом.

Варианты: I — один центральный ввод; II — один боковой ввод; III — два боковых ввода; IV — три боковых ввода; V — четыре боковых ввода.

резервуара. Вводы должны иметь штуцера или полугайки для подключения специальных шлангов или пожарных прорезиненных рукавов при их применении для подачи воздуха.

Расчет системы тушения воздухом производится следующим образом. Уравнение (22) записываем по формуле (34), т. е.

в форме связи между параметрами системы в критических условиях:

$$\frac{D}{g \tau_{кр}^2} = \frac{A + B H_{0 \text{ кр}}}{C H_{0 \text{ кр}}^{-m} + G_{кр}^{-n}}. \quad (36)$$

Подставляя вместо $\tau_{кр}$ его значение, которое примем согласно рис. 34 и 35 равным 7 сек., что соответствует начальной температуре горючей жидкости приблизительно $20-30^\circ$ а вместо коэффициентов A, B, C их числовые значения для центрального ввода и боковых вводов, и после некоторых преобразований получим: для системы боковых вводов

$$q = 0,033 \sqrt{D_0^5} \left[\frac{D_0}{1 + 33,5 H_0 - 0,69 \frac{D}{H_0^{2,3}}} \right]^{0,6} \text{ л/сек}; \quad (37)$$

для одного центрального ввода

$$q = 0,03 \cdot n \sqrt{D_0^5} \cdot \left[\frac{D_0}{1 + 0,84 H_0 - 0,116 \frac{D_0}{H_0^{0,43}}} \right]^{0,6} \text{ л/сек}, \quad (38)$$

где n — число боковых вводов;

D_0 — эквивалентный диаметр в м;

H_0 — приведенная высота слоя топлива в м,

которая равна

$$H_0 = \frac{h^2 \sqrt[3]{1 + \frac{\gamma h}{P_0}}}{D_0} \text{ м},$$

где γ — удельный вес горючей жидкости в кг/м^3 ;

h — высота слоя жидкости в резервуаре в м;

P_0 — атмосферное давление в кг/м^2 .

Значение эквивалентного диаметра для рекомендуемых систем тушения можно определить по числу вводов, где величина D_0 дана как часть от диаметра резервуара D .

Один боковой ввод	$D_0 = 2D$
Два боковых ввода	$D_0 = D$
Три боковых ввода	$D_0 = 0,87D$
Четыре боковых ввода	$D_0 = 0,76D$

Для одного центрального ввода эквивалентный диаметр равен диаметру резервуара.

Формулы (37) и (38) дают значение расхода воздуха, необходимого для тушения, в зависимости от диаметра резервуара, высоты слоя жидкости и числа вводов воздуха при критических условиях. Иначе говоря, расход воздуха, вычисленный по этим формулам, будет минимально необходимым для успешного тушения. Опыты и расчет по формулам (37) и (38) показывают, что

эффект тушения в резервуаре данного диаметра существенно зависит от высоты слоя жидкости в резервуаре. Чем больше слой топлива, тем эффективнее тушение при заданном расходе воздуха. Существует для данной системы вводов некоторая минимальная высота слоя жидкости, при которой тушение перемешиванием с помощью воздуха вообще неосуществимо при любых расходах воздуха.

При расчете задаются величинами D и n , но этого недостаточно. Формулы (37) и (38) содержат еще две неопределенные величины — расход воздуха и минимальный уровень жидкости, соответствующий этому расходу, ниже которого тушение достигнуто не будет. Поэтому необходимо еще задаться одной из этих величин.

Опытами установлено, что оптимальная интенсивность подачи воздуха равна $0,5 \text{ л/сек}$ на 1 м^2 поверхности горения для жидкостей с вязкостью не более 3°Е . Для жидкостей с вязкостью от 3 до 12°Е оптимальная интенсивность подачи воздуха равна $0,6 \text{ л/сек м}^2$. Для более вязких топлив интенсивность подачи воздуха следует выбирать от $0,7$ до $1,0 \text{ л/сек м}^2$.

Задавшись интенсивностью подачи воздуха, можно вычислить общий расход воздуха, необходимый для тушения в данном резервуаре по формуле

$$q = \frac{\pi D^2}{4} \cdot Q \text{ л/сек}, \quad (39)$$

где Q — интенсивность подачи воздуха в л/сек м^2 .

Подставляя значение расхода воздуха, вычисленное по формуле (39), в формулы (37) или (38), можно вычислить значение минимального уровня жидкости в резервуаре, ниже которого при данном расходе воздуха тушение достигнуто не будет.

В табл. 5 приведены значения расходов воздуха, необходимых для тушения жидких топлив в стандартных резервуарах. Для нестандартных резервуаров следует либо производить расчет, либо пользоваться данными для ближайшего по размеру резервуара. В этой же таблице приводятся значения давлений воздуха, которые необходимо установить вблизи ввода воздуха в резервуар. К этому давлению необходимо прибавлять потери напора в воздухопроводах, расчет которых производится по обычной методике.

В табл. 6 даны значения минимальных уровней жидкости в резервуаре для рекомендуемых систем вводов. Если уровень жидкости в резервуаре будет ниже указанного в таблице, то эффективное тушение маловероятно.

Системы тушения пожаров жидкого топлива струями включают насос, трубопроводы и вводы струй жидкости в резервуар. Рекомендуемые схемы вводов показаны на рис. 37. Вводы располагаются на днище резервуара с таким расчетом, чтобы насадки располагались по окружности $0,5D$ для 3 и 4 вводов, и $0,58D$ для 6 вводов. Разводка вводов производится от коллектора, связанного с магистральным трубопроводом входной трубой. На

Таблица 5

Вязкость нефтепродук- та, ВУ ²⁰	Интенсив- ность подачи воздуха в л/сек на 1 м ²	Емкость ре- зервуара, м ³	Площадь го- релочного, м ²	Высота ре- зервуара, м	Расход воз- духа в л/сек (при 760 мм рт. ст. и 20° С)	Максималь- ное давление воздуха, атм (при полном заполнении резервуара)
До 3	0,5	100	26	4,14	13	0,40
		200	40	5,51	20	0,55
		300	58	5,51	29	0,55
		400	58	6,87	29	0,70
		700	102	6,87	51	0,70
		1000	102	9,70	51	1,00
		2000	182	11,26	91	1,15
		3200	283	11,26	142	1,15
		4600	410	11,44	205	1,15
3—12	0,6	100	26	4,14	16	0,45
		200	40	5,51	24	0,60
		300	58	5,51	35	0,60
		400	58	6,87	35	0,75
		700	102	6,87	62	0,75
		1000	102	9,70	62	1,05
		2000	182	11,26	110	1,20
		3200	283	11,26	170	1,20
		4600	410	11,44	246	1,20
12—25	0,7	100	26	4,15	18	0,50
		200	40	5,51	28	0,65
		300	58	5,51	41	0,65
		400	58	6,87	41	0,80
		700	102	6,87	72	0,80
		1000	102	9,70	72	1,10
		2000	182	11,26	128	1,25
		3200	283	11,26	200	1,25
		2600	410	11,44	287	1,25

Примечание. Табл. 5 заимствована из «Временных указаний по тушению нефтепродуктов в резервуарах методом перемешивания с помощью сжатого воздуха», выпуск 1955 г.

концах вводов ставятся насадки (рис. 38). Насадок должен иметь внутренние кромки округленными для уменьшения потерь напора. Высота насадков над дном резервуара должна быть порядка 300—500 мм.

Исходными данными для расчета системы тушения перемешиванием струями являются диаметр резервуара D и число вводов струй n , диаметр и длина трубопроводов. Для заданных величин D и n необходимо определить мощность насоса, предназначенного для перемешивания, и внутренний диаметр насадков, которые необходимо установить на концах вводов. Часто характеристика $Q-H$ насоса бывает известна. Тогда весь расчет сводится к подбору числа вводов и диаметров насадков.

Таблица 6

Емкость резервуара, м ³	Диаметр резервуара, м	Площадь зеркала горючего, м ²	Высота резервуара, м	Минимальный уровень жидкости, при котором обеспечивается тушение				
				один цен- тральный ввод, вариант I	один боковой ввод, вариант II	два боковых ввода, вариант III	три боковых ввода, вариант IV	четыре боко- вых ввода, вариант V
100	5,68	26	4,14	1,50	2,90	1,70	—	—
200	7,11	40	5,51	2,10	3,50	2,0	1,80	—
300	8,53	58	5,51	2,60	4,20	2,20	2,10	—
400	8,53	58	6,87	2,60	4,90	2,20	2,10	—
700	11,38	102	6,87	4,10	—	2,70	2,50	2,40
1000	11,38	102	9,70	4,10	—	2,70	2,50	2,40
2000	15,22	182	11,27	—	—	3,30	3,0	2,80
3200	19,00	283	11,26	—	—	—	3,50	3,20
4600	22,84	410	11,44	—	—	—	4,20	3,70

Примечание. Для нестандартных резервуаров следует производить расчеты или пользоваться данными табл. 6 для ближайшего диаметра большего размера.

Формулу (28) для времени пробега при перемешивании струями можно записать в виде (35):

$$\tau_{кр} = \frac{aD_0^2}{dv_0 \text{ кр}} \quad (40)$$

Принимая, как при перемешивании воздухом, критическое время пробега равным 7 сек. и вводя коэффициент запаса, который примем равным 1,2, после некоторых преобразований получим выражение для расхода жидкости через систему перемешивания:

$$Q_{\tau} = 0,0355 \times \times n d D_0^2 \text{ м}^3/\text{час}, \quad (41)$$

где n — число вводов;
 d — диаметр насадка в мм;

D_0 — эквивалентный диаметр в м, который можно определить в зависимости от числа вводов по табл. 7.

По формуле (41) определяется минимально необходимый расход нефтепродукта через систему вводов, который необходим

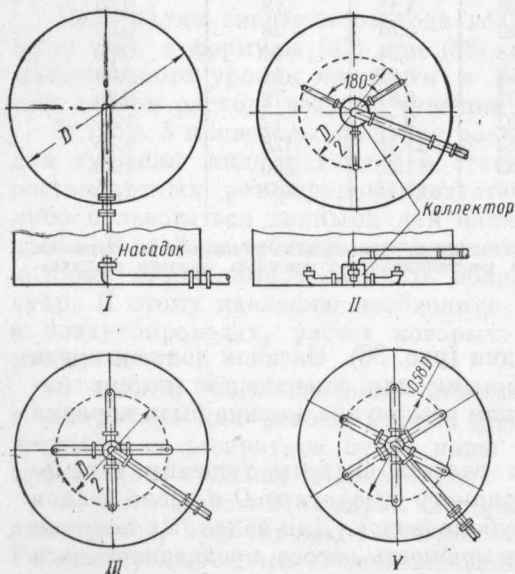


Рис. 37. Рекомендуемые системы вводов для перемешивания струями той же жидкости. Варианты: I — один центральный ввод; II — три ввода; III — четыре ввода; V — шесть вводов.

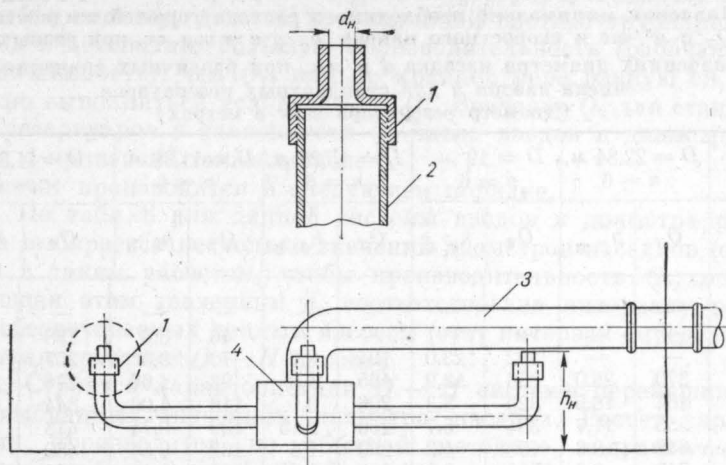


Рис. 38. Разводка вводов внутри резервуара.

1 — насадок; 2 — труба ввода; 3 — входная труба; 4 — коллектор.

Таблица 7

Система вводов для стандартных резервуаров

Диаметр резервуара, м	Емкость резервуара, м ³	Рекомендуемая система вводов	Эквивалентный диаметр, м
5,68	100	Один ввод, вариант I	5,68
		Три ввода, вариант II	3,3
		Четыре ввода, вариант III	2,9
7,11	200	Один ввод, вариант I	7,11
		Три ввода, вариант II	4,12
		Четыре ввода, вариант III	3,56
8,53	300, 400	Шесть вводов, вариант IV	2,50
		Четыре ввода, вариант IV	4,25
		Три ввода, вариант II	4,95
		Один ввод, вариант I	8,53
11,38	700, 1000	Шесть вводов, вариант IV	3,30
		Четыре ввода, вариант III	5,70
15,22	2000	Шесть вводов, вариант IV	4,40
19,00	3200	Шесть вводов, вариант IV	5,50
22,84	4600	Шесть вводов, вариант IV	6,60

Примечание. Для нестандартных резервуаров выбирается система вводов для ближайшего по диаметру стандартного резервуара.

Таблица 8

Значения минимально необходимого расхода горючей жидкости Q_T в м³/час и скоростного напора $h_{c.н}$ в м вод. ст. при разных значениях диаметра насадка d в мм, при различных значениях числа вводов n для стандартных резервуаров
(Диаметр резервуара взят в метрах)

	$D = 22,84 \text{ м},$ $n = 6$		$D = 19 \text{ м},$ $n = 6$		$D = 15,22 \text{ м},$ $n = 6$		$D = 11,38 \text{ м},$ $n = 6$		$D = 11,38 \text{ м},$ $n = 4$	
d	Q_T	$h_{c.н}$	Q_T	$h_{c.н}$	Q_T	$h_{c.н}$	Q_T	$h_{c.н}$	Q_T	$h_{c.н}$
15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20	—	—	—	—	—	—	46	6,6	138	57
30	—	—	192	23,0	124	8,6	70	3,0	207	25
40	370	26,0	256	12,9	165	4,8	93	1,66	276	14
50	462	16,9	320	8,3	206	3,1	116	1,06	344	9
60	555	11,7	384	5,7	250	2,15	139	0,74	413	6,4
70	648	8,6	450	4,2	290	1,6	162	0,54	480	4,6
80	740	6,6	512	3,2	330	1,2	186	0,41	550	3,6

	$D = 8,53 \text{ м},$ $n = 6$		$D = 8,53 \text{ м},$ $n = 4$		$D = 8,53 \text{ м},$ $n = 3$		$D = 8,53 \text{ м},$ $n = 1$		$D = 7,11 \text{ м},$ $n = 4$	
d	Q_T	$h_{c.н}$	Q_T	$h_{c.н}$	Q_T	$h_{c.н}$	Q_T	$h_{c.н}$	Q_T	$h_{c.н}$
15	20,2	4,0	38,6	32,4	38,6	59,0	38,6	520	—	—
20	27,0	2,2	51,5	18,2	51,5	33,0	51,5	290	36	9,0
30	40,5	1,0	77,0	8,1	77,0	14,7	77,0	130	54	4,0
40	54,0	0,6	103	4,6	103	8,3	103	73	72	2,2
50	67,5	0,4	129	2,9	129	5,3	129	47	90	1,4
60	81,0	0,3	154	2,0	154	3,7	154	32	108	1,0
70	94,0	0,2	180	1,5	180	2,7	180	24	126	0,7
80	—	—	206	1,1	206	2,0	206	18	144	0,56

	$D = 7,11 \text{ м},$ $n = 3$		$D = 7,11 \text{ м},$ $n = 1$		$D = 5,68 \text{ м},$ $n = 4$		$D = 5,68 \text{ м},$ $n = 3$		$D = 5,68 \text{ м},$ $n = 1$	
d	Q_T	$h_{c.н}$	Q_T	$h_{c.н}$	Q_T	$h_{c.н}$	Q_T	$h_{c.н}$	Q_T	$h_{c.н}$
15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20	36	16	36	140	23,8	3,9	23,8	6,7	23,8	59,0
30	54	7,1	54	62,0	36,0	1,7	36,0	3,0	36,0	26,0
40	72	4,0	72	35,0	48,0	0,96	48,0	1,7	48,0	14,6
50	90	2,5	72	35,0	60,0	0,62	60,0	1,1	60,0	9,4
60	108	1,8	108	15,5	71,0	0,43	71,0	0,74	71,0	6,5
70	126	1,3	126	11,4	84,0	0,32	84,0	0,54	84,0	4,8
80	144	1,0	144	8,7	95,0	0,24	95,0	0,24	95,0	3,6

Примечание. Расход Q_T — представляет собой расход через всю систему вводов. Расход через один насадок подсчитывается по формуле $Q_T : n$, где n — число насадков, а Q_T берется из таблицы. Здесь приведены ориентировочные значения скоростного напора $h_{c.н}$. Эти значения могут служить лишь вспомогательным материалом при выборе необходимого диаметра насадка. Вычисление точного значения $h_{c.н}$ производится по формуле (43).

для тушения нефтепродукта в данном резервуаре. Насос, включенный в систему, должен при заданной системе трубопроводов и вводов обеспечить большую производительность (рабочая производительность), чем Q_t , или по крайней мере равную ей, т. е. должно выполняться условие $Q_p \geq Q_t$. Значение Q_t для стандартных резервуаров в зависимости от числа вводов и диаметра насадка d приведено также в табл. 8.

Расчет производится в следующем порядке.

1. По табл. 8 для данной системы вводов и диаметра резервуара выбирается несколько значений диаметров насадков (около трех) с таким расчетом, чтобы производительность Q_t , соответствующая этим значениям d , соответствовала интервалу расходов, обеспечиваемых данным насосом (этот интервал определяется по характеристике $Q - H$ насоса).

2. Строятся характеристики $Q - H$ системы перемешивания при выбранных значениях диаметра насадка. Расчет характеристик производится по обычной методике гидравлического расчета трубопроводов¹. Требуемый напор H определяется по формуле

$$H = h_{тр} + h_{м.с} + h_{с.н} + h_{нив}, \quad (42)$$

где $h_{тр}$ — потеря напора на трение в трубопроводах;

$h_{м.с}$ — потеря напора на местные сопротивления;

$h_{с.н}$ — скоростной напор;

$h_{нив}$ — разность нивелирных отметок.

Значения величин $h_{тр}$ и $h_{м.с}$ определяются обычными методами с учетом особенностей данного конкретного случая. Скоростной напор определяется по формуле

$$h_{с.н} = \frac{16 Q^2 \left(1 - \frac{d^4}{d_{тр}^4}\right)}{2g \varphi^3 n^2 \pi^2 d^4}, \quad (43)$$

где Q — расход жидкости через систему тушения;

g — ускорение силы тяжести;

φ — коэффициент истечения насадка; определяется в зависимости от формы насадка;

n — число вводов;

d — диаметр насадка;

$d_{тр}$ — диаметр трубы ввода.

В табл. 8 приведены ориентировочные значения скоростного напора при заданных значениях d и Q_t , для различных систем вводов и диаметров резервуара. Расчет производился в предположении, что $\varphi = 0,6$, а значение $d^4/d_{тр}^4$ мало по сравнению с единицей.

¹ См., например, Г. А. Пектемиров. Справочник инженера и техника нефтебаз. Гостоптехиздат, 1954.

3. На построенных характеристиках $Q - H$ трубопровода отмечаются точки, соответствующие значениям Q_T при заданных значениях диаметра насадка. По этим точкам строится граничная кривая, отделяющая поле значений Q и H , при которых пламя потухнет.

4. Строится характеристика $Q - H$ насоса. Если характеристика насоса проходит через области значений, составляющих область тушения, то на участке граничной кривой, лежащей под характеристикой насоса, выбирается такая точка, чтобы характеристика трубопровода, проходящая через эту точку, пересекала характеристику насоса в устойчивой ее части. По этому значению Q_T из табл. 8 определяется диаметр насадка d . Это значение d будет, очевидно, самым выгодным, так как характеристика трубопровода при этом значении d пересечет характеристику насоса в точке (рабочая точка), определяющей наиболее выгодный при данных условиях режим работы насоса. Кроме того, будет выполнено условие $Q_p \geq Q_T$.

Если граничная кривая проходит над характеристикой насоса, то, очевидно, условие $Q_p \geq Q_T$ не будет выполнено ни при одном значении диаметра насадка, т. е. данный насос для перемешивания непригоден.

Если один насос не обеспечивает перемешивания, необходимого для тушения, то можно включить в систему несколько насосов параллельно или последовательно. В этом случае при расчете определяется суммарная характеристика $Q - H$ группы насосов.

Пример. Допустим, требуется оборудовать резервуар емкостью 400 м³ (диаметр $D = 8,53$ м) системой тушения перемешиванием при помощи струй нефтепродукта. В резервуаре хранится тракторный керосин. Резервуар связан с насосной нефтебазы двумя трубопроводами, внутренний диаметр которых равен 110 мм. Насосная станция имеет центробежный насос марки ЗК-13 (2900). Допустим, что для перемешивания во время тушения будет использован центробежный насос. Характеристика этого насоса показана на рис. 39. Насос обеспечивает производительность $Q = 20-45$ м³/час при напоре 14-10 м вод. ст. При выборе системы вводов следует ориентироваться на эти интервалы расхода и напора. Очевидно, в этом случае целесообразно оборудовать резервуар системой из шести вводов (вариант IV), так как для этой системы производительность 20-45 м³/час может обеспечить эффективное перемешивание при сравнительно небольших напорах.

Если взять систему из четырех вводов, то тушение при производительности в интервале значений 20-45 м³/час может быть достигнуто только при скоростных напорах, превышающих напор, обеспечиваемый насосом (см. табл. 8). Итак резервуар оборудуется системой из шести вводов.

Следующий этап заключается в подборе внутреннего диаметра d насадков, которые должны быть установлены на концах вводов. Мы должны построить характеристики $Q - H$ трубопровода при нескольких значениях диаметра насадка. Из табл. 8 выбираем три значения d , при которых минимально необходимые расходы Q_T укладываются в интервал 20-45 м³/час, обеспечиваемый насосом. Эти значения равны $d_1 = 15$ мм, $d_2 = 20$ мм, $d_3 = 30$ мм. Строим характеристики $Q - H$ нагнетательного

трубопровода при этих значениях d , пользуясь следующими данными:

- 1) внутренний диаметр трубопровода $d_{\text{тр}} = 110$ мм;
- 2) длина трубопровода до резервуара $l_{\text{тр}} = 100$ м;
- 3) внутренний диаметр входной трубы $d_{\text{вх}} = 110$ мм;
- 4) длина входной трубы $l_{\text{вх}} = 10$ м;
- 5) диаметр труб вводов $d_{\text{вв}} = 50$ мм;
- 6) длина трубы ввода от коллектора до насадков $l_{\text{вв}} = 2,5$ м;
- 7) разность нивелирных отметок насоса и самого верхнего уровня нефтепродукта в резервуаре $h_{\text{нив}} = 6$ м;

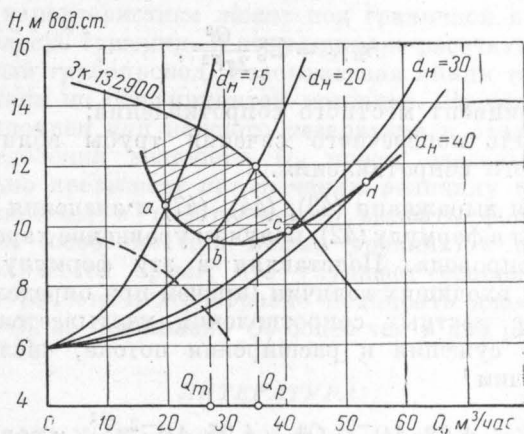


Рис. 39. Характеристики $Q - H$ системы тушения струями и характеристика $Q - H$ насоса.

8) коэффициент истечения насадка принимаем равным $\varphi = 0,6$;

9) число вводов $n = 6$.

Потери на трение в системе определяем по формуле

$$h_{\text{тр}} = \left(\lambda_{\text{тр}} \cdot \frac{l_{\text{тр}}}{d_{\text{тр}} F_{\text{тр}}^2} + \lambda_{\text{вх}} \cdot \frac{l_{\text{вх}}}{d_{\text{вх}} F_{\text{вх}}^2} + \lambda_{\text{вв}} \cdot \frac{l_{\text{вв}}}{d_{\text{вв}} F_{\text{вв}}^2} \right) \cdot \frac{Q^2}{2g}, \quad (44)$$

где $\lambda_{\text{тр}}$, $\lambda_{\text{вх}}$, $\lambda_{\text{вв}}$ — коэффициенты гидравлического сопротивления;

$F_{\text{тр}}$, $F_{\text{вх}}$, $F_{\text{вв}}$ — площади поперечного сечения трубопровода, входной трубы и вводов.

Коэффициент λ определяется в зависимости от режима течения жидкости. Для турбулентного течения

$$\lambda = \frac{0,3169}{Re^{0,25}}; \quad (45)$$

для ламинарного течения

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (46)$$

Интересующая нас область значений расходов начинается с $20 \text{ м}^3/\text{час}$. Число Re при этом значении Q в трубопроводе равно

$$Re = \frac{20 \cdot 4}{3600 \cdot 3,14 \cdot 0,11 \cdot 0,2 \cdot 100^2} \approx 3200,$$

т. е. режим течения турбулентный при расходе $Q = 20 \text{ м}^3/\text{час}$ и выше. Поэтому для подсчета λ пользуемся формулой (45).

Коэффициент вязкости ν будем принимать равным $0,2 \text{ см}^2/\text{сек}$. Потери напора в местных сопротивлениях определяем по формуле

$$h_{\text{м.с}} = \Sigma \xi \frac{Q^2}{2gF^2}, \quad (47)$$

где ξ — коэффициент местного сопротивления;

F — площадь поперечного сечения трубы вблизи данного местного сопротивления.

Подставляя выражения (43), (44), (47) и значения нивелирной разности высот в формулу (42), получим уравнение характеристики $Q - H$ трубопровода. Подставляя в эту формулу численные значения всех входящих величин (причем при определении суммы коэффициентов местных сопротивлений учитывается число поворотов, мест сужения и расширения потока, число задвижек и т. д.), получим¹

$$H = 6 + 1,68 \cdot 10^{-3} \cdot Q^2 + 4,95 \cdot 10^{-2} \frac{Q^2}{d^4} \text{ м вод. ст.}, \quad (48)$$

здесь Q — должно быть в $\text{м}^3/\text{час}$;
 d — в см .

Задавая значения Q в интервале от 5 до $80 \text{ м}^3/\text{час}$ строим три характеристики $Q - H$ системы при значениях $d_1 = 15 \text{ мм}$, $d_2 = 20 \text{ мм}$, $d_3 = 30 \text{ мм}$. На этих характеристиках отмечаем точки a , b , c , соответствующие расходам $Q_{\text{т}} = 20,2 \text{ м}^3/\text{час}$, $Q_{\text{т}} = 27 \text{ м}^3/\text{час}$, $Q_{\text{т}} = 40,5 \text{ м}^3/\text{час}$. Значения этих расходов берем из табл. 8 при $n = 6$ и диаметрах насадка 15, 20, 30 мм. Соединяя точки a , b , c плавной кривой, получаем область значений Q и H , при которых тушение будет эффективным. Как видно из рис. 39, характеристика насоса отсекает часть этой области (заштриховано). На граничной кривой выбираем такое значение $Q_{\text{т}}$, чтобы точка пересечения характеристики насоса и трубопровода (рабочая точка) лежала на устойчивом участке характеристики насоса. Таким будет значение $Q_{\text{т}} = 27 \text{ м}^3/\text{час}$. Этому соответствует значение диаметра насадка, равное 20 мм. Следовательно, наиболее выгодным является насадок с внутренним диаметром 20 мм. При этом рабочая точка определяется при

¹ Так как пример носит чисто методический характер, то все вычисления сделаны приближенно.

$Q_p = 35 \text{ м}^3/\text{час}$ и $H_p = 12 \text{ м}$ вод. ст., т. е. условие $Q_p \geq Q_t$ выполняется.

На рис. 39 показана также характеристика трубопровода при $d = 40 \text{ мм}$. Значение Q_t , соответствующее этому диаметру насадка, равно $54 \text{ м}^3/\text{час}$ (точка d). Для этого случая условие $Q_p \geq Q_t$ не выполняется, так как $Q_p = 45 \text{ м}^3/\text{час}$.

Кроме того, на рис. 37 прерывистой линией обозначена характеристика какого-то центробежного насоса. Очевидно, насос с такой характеристикой ни при одном значении диаметра насадка не обеспечит перемешивания, необходимого для тушения, так как его характеристика лежит под граничной кривой, охватывающей область тушения. В этом примере рассчитывали только нагнетательный трубопровод. Всасывающая линия также должна быть рассчитана по общепринятой методике. Расчет систем должен быть выполнен для каждого резервуара в отдельности.

При определении величины Q_p может оказаться так, что Q_p значительно превышает по значению величину Q_t . При этом включение системы в работу может вызвать фонтанирование нефтепродукта (особенно при малых уровнях) с образованием большого количества брызг, что ухудшает условия тушения. Поэтому при расчете целесообразно подбирать диаметр насадка d так, чтобы Q_p не превышало Q_t более чем в два раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блиннов В. И., Худяков Г. Н., Петров И. И., Реутт В. Ч. О движении жидкости в резервуаре при перемешивании ее струей воздуха. Инженерно-физический журнал № 11, т. I, 1958.
2. Блиннов В. И. О трех режимах горения жидкостей в резервуарах. Изв. АН СССР, ОТН, 1956.
3. Блиннов В. И., Худяков Г. Н., Петров И. И. О механизме тушения пламени нефтепродуктов в резервуарах путем перемешивания их воздухом. Информационный сборник ЦНИИПО, 1958.
4. Годжелло М. Г., Демидов П. Г., Джалалов Е. М., Коршак З. В., Рябов И. В. Легко воспламеняющиеся и горючие жидкости. Справочник, изд. МКХ, РСФСР, 1956.
5. Павлов П. П., Сухов Я. В. Тушение в резервуарах пожаров нефтепродуктов путем перемешивания последних с помощью сжатого воздуха. Труды Азербайджанского индустриального института им. Азизбекова, в. XII, 1956.
6. Реутт В. Ч. Применение методов теории подобия и размерности к изучению гидродинамики процесса перемешивания в резервуарах. Информационный сборник ЦНИИПО, 1958.
7. Телетов С. Г. Уравнения гидродинамики двухфазных жидкостей. Доклады АН СССР, т. 2. 1945.
8. Худяков Г. Н. О температурном поле жидкости, горящей со свободной поверхности, и о факеле над ней. Изд. АН СССР, ОТН, 7, 1951.

В. А. ГЕРАСИМОВ, И. И. ПЕТРОВ, В. Ч. РЕУТТ

Инженеры

ТУШЕНИЕ ПЛАМЕНИ НЕФТЕПРОДУКТОВ РАСПЫЛЕННОЙ ВОДОЙ

Попытки использовать воду для тушения пламени нефтепродуктов или других горючих жидкостей делались давно [1], [2], однако они заканчивались неудачей, и только в последние 5—7 лет была доказана возможность тушения пламени горючих жидкостей распыленной водой. Так, в 1954 г. была опубликована работа В. Росбаха и З. Роговского [3], в которой описывались результаты проделанных ими опытов по тушению пламени бензина в резервуаре диаметром 30 см распыленной водой. В том же 1954 г. Н. М. Антонов и Н. Ф. Лабеев успешно провели опыты по тушению пламени автомобильного и авиационного бензинов в резервуарах диаметром 1,5 и 2 м тонкораспыленной водой [4]. Исследования, проведенные в ЦНИИПО совместно с Энергетическим институтом им. Г. М. Кржижановского АН СССР, подтвердили возможность применения распыленной воды для гашения пламени горючих жидкостей [5]. В этой работе были выявлены необходимые и достаточные условия для гашения пламени горючей жидкости распыленной водой. Было показано, что распыленная вода должна одновременно покрывать всю поверхность горячей жидкости; что должна соблюдаться определенная степень распыления воды, а именно, средний размер капель воды не должен превышать 100 мк; что интенсивность подачи распыленной воды на единицу площади горячей поверхности не должна быть меньше $0,16 \text{ л/сек м}^2$.

Механические водораспылители для тушения пожаров нефтепродуктов в резервуарах

Для тушения пламени бензинов и других более тяжелых нефтепродуктов приемлемыми оказались пока два типа механических распылителей: распылитель центробежного типа и распылитель винтового типа.

Распылитель центробежного типа. В настоящее время наиболее теоретически изученным и практически проверенным является

распылитель центробежного типа [5]. Центробежная форсунка имеет, как известно, форму цилиндра с центральным выходным соплом, расположенным в торцевой части цилиндра. Расход воды из одной центробежной форсунки мал, а факел распыла воды имеет малую плотность в центре. Для получения более плотного и большого факела распыла был создан распылитель, состоящий из нескольких центробежных форсунок, расположенных на полусфере [5].

Исходя из теории центробежной форсунки [6] и специальных опытов, проведенных в ЦНИИПО [7], были выбраны оптимальные размеры элементов одиночных форсунок.

Техническая характеристика распылителя, состоящего из 151 центробежного элемента, такова: максимальная площадь, орошаемая одним распылителем при высоте расположения распылителя над поверхностью горючей жидкости не менее 1,5 м, порядка 30 м²; суммарный расход воды при давлении у распылителя $P = 10 \text{ кг/см}^2 - 9 \text{ л/сек}$; средний размер капель распыленной воды в пределах 60—80 мк.

Рекомендуемые размеры одиночных форсунок и их необходимые гидравлические характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1

<i>A</i>	$R_{\text{вн}}$, мм	$r_{\text{с}}$, мм	$F_{\text{вх}}$, мм ²	<i>n</i>	$l \times h$, мм	$F_{\text{с}}$, см ²	μ	q , л/сек	$d_{\text{к}}$, мк
3	10	1,00	10,50	3	1,5 × 2	0,0314	0,189	0,083	42
3	8	1,00	8,37	3	1,4 × 2	0,0314	0,189	0,083	42
3	6	1,00	6,28	3	1 × 2,1	0,0314	0,189	0,083	42
1	5	0,75	11,75	3	2 × 1,9	0,0173	0,370	0,091	65

Здесь:

A — геометрическая характеристика форсунки:

$$A = \frac{R_{\text{вн}} r_{\text{с}}}{r_{\text{вн}}^2};$$

$R_{\text{вн}}$ — внутренний радиус вихревого колпачка;

$r_{\text{с}}$ — радиус сопла (выходного отверстия);

$r_{\text{вх}}$ — приведенный радиус входного отверстия (тангенциальных щелей);

$F_{\text{вх}}$ — общая площадь тангенциальных щелей или входных отверстий в колпачке;

n — число тангенциальных щелей в колпачке;

l — ширина тангенциальной щели;

h — высота рабочей части щели;

$F_{\text{с}}$ — площадь сопла;

μ — коэффициент расхода;

q — расход воды из одиночной форсунки при давлении $P = 10 \text{ кг/см}^2$;

d_k — среднелинейный размер капель распыленной воды, получаемой из данной форсунки.

Распылительная головка центробежного типа представляет собой агрегат, состоящий из 151 центробежной форсунки. Разрез общего вида показан на рис. 1. Корпус головки 2 изготовлен из алюминиевого сплава в виде пустотелой полусферы. Внутри этой полусферы проточены конусные гнезда, в которые вставляются рабочие колпачки 3, 4, 5 и 6. Колпачки представляют собой дюралевые точеные стаканчики, имеющие три тангенциальных (косых) паза (рис. 2). Причем геометрические размеры колпачков выбраны так, что верхние два ряда (позиции 5 и 6, рис. 1) дают более крупные капли по сравнению с остальными. Это необходимо для того, чтобы верхние ряды, давая более крупные капли, образовывали как бы защитный зонт, который уменьшает подсос воздуха к факелу распыла и тем самым увеличивает радиус эффективного действия распылительной головки.

Для предотвращения засорения головки в верхней части корпуса ставится латунная сетка 1. Корпус головки закрывается крышкой 7, имеющей в верхней части двухдюймовую внутреннюю резьбу для навинчивания головки на специальный водоподъемник. Крышка крепится к корпусу двенадцатью болтами 9, 10. Между крышкой и корпусом ставится паронитовая прокладка 8.

На рис. 3 приведена характеристика расход — напор для распылительной головки. Опытами установлено, что одной головкой подавляется горение бензина в резервуаре $D = 5,3 \text{ м}$ (площадь зеркала горения $22,5 \text{ м}^2$) при напоре у распылителя $9\text{--}10 \text{ ат}$ и четырьмя такими головками в резервуаре $D = 8,6 \text{ м}$ при высоте свободного борта $1,5 \text{ м}$. При низком уровне заполнения тушение пламени бензина достигалось тремя распылителями.

Распылители винтового типа. Распылительная головка центробежного типа, описанная выше, имеет ряд недостатков, наиболее существенными из них являются большой вес при сравнительно малой производительности и площади орошения, а также засоряемость.

Для тушения пожаров горючих жидкостей в резервуарах может быть применен распылитель винтового типа, который не имеет указанных недостатков [8]. Винтовой распылитель показан на рис. 4.

Гидравлические испытания изготовленных распылителей показали, что они дают большой факел распыла в форме пустотелого зонта и сравнительно крупные капли.

Принцип действия винтового распылителя заключается в следующем: компактная струя воды, попадая в конусное отверстие распылителя, разветвляется его витками в пленку, которая на некотором расстоянии дробится на капли (рис. 5).

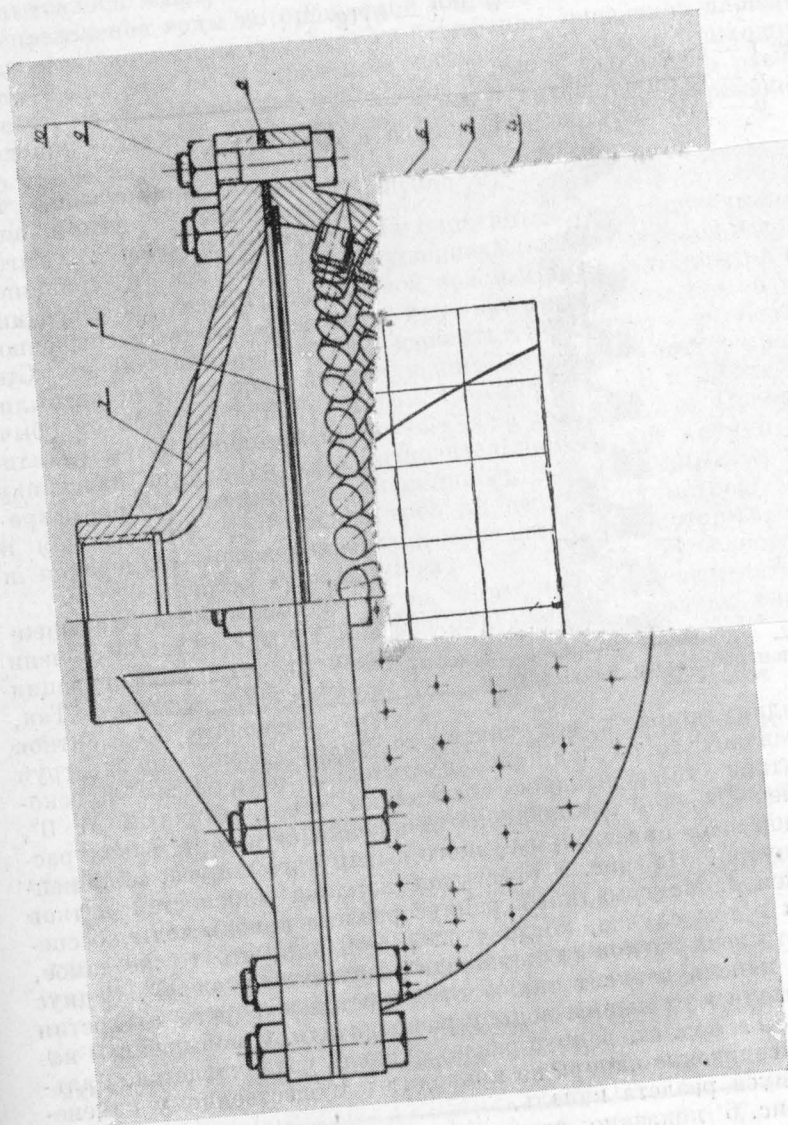


Рис. 1. Распылитель

Диаметр капель зависит от толщины пленки δ , срезываемой витками распылителя, которая в свою очередь зависит от шага винта t и угла внутреннего конуса

$$\delta = (t - h) \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2},$$

где t — шаг витка в мм;

h — толщина витка в мм;

α — угол внутреннего конуса в градусах.

ралевые точеные стаканчики, (косых) паза (рис. 2). Причем гео. выбраны так, что верхние два ря. более крупные капли по сравнению для того, чтобы верхние ряды, да. зовывали как бы защитный зон. воздуха к факелу распыла и тем са. тивного действия распылительной

Для предотвращения засорени. корпуса ставится латунная сетка 1. крышкой 7, имеющей в верхней ч. ную резьбу для навинчивания гол. подъемник. Крышка крепится к к. 9, 10. Между крышкой и корпусом. кладка 8.

На рис. 3 приведена характерис. пылительной головки. Општам. к.

Рис. 2. Колпачок вихревой камеры центробежного распылителя.

Было установлено, что распылитель с углом вну. треннего конуса 2° , шагом винта 20 мм и толщиной витка 10 мм дает средний размер капель распыленной воды порядка 100 мк. Сте. пень дисперсности распыли. теля определялась по обыч. ной методике путем улавли. вания капель на пластинку с вазелином, фотографиро. вания под микроскопом и последующего измерения и подсчета капель.

Форма факела распылен. ной воды в сильной степени зависит от конфигурации плоскостей витков. Так, если плоскости всех витков

перпендикулярны к оси винта, то факел распыленной струи представляет собой широкий пустотелый зонт. Если плоско. сти витков горизонтально составляют угол, отличный от 0° , например 45° , по направлению движения струи, то факел рас. пыленной воды имеет форму узкого вытянутого конуса, заполнен. ного внутри. На рис. 5 этот угол наклона плоскостей витков обозначен β . Максимальный радиус разлета капель воды обеспе. чивался в том случае, когда угол $\beta = 0$ или, что то же самое, плоскости всех витков с осью винта составляли угол 90° . Радиус разлета капель зависит также от диаметра входного отверстия распылителя и от напора воды у распылителя. С повышением на. пора до 80 м вод. ст. радиус разлета капель увеличивается. Даль. нейшее увеличение напора не приводит к существенному измене. нию радиуса разлета капель.

На рис. 6 показано изменение радиуса разлета капель R в зависимости от диаметра входного отверстия распылителя. Из графика видно, что величина R растет до определенного пре. дела. Предельный радиус разлета капель составляет приблизи. тельно 7,5 м при диаметре входного отверстия свыше 40 мм.

Следует указать, что величина орошаемой площади может быть уменьшена по желанию, если соответствующим образом выбрать угол β . Максимальный радиус разлета капль, как уже указывалось выше, соответствует углу $\beta = 0$. Но в этом случае распределение воды по орошаемой площади очень неравномерно. Большая часть воды выпадает на периферии орошаемой площади, в то время как на центральную часть этой площади приходится весьма малое количество воды. Для более равномерного распределения воды по орошаемой площади угол β делается переменным по длине распылителя.

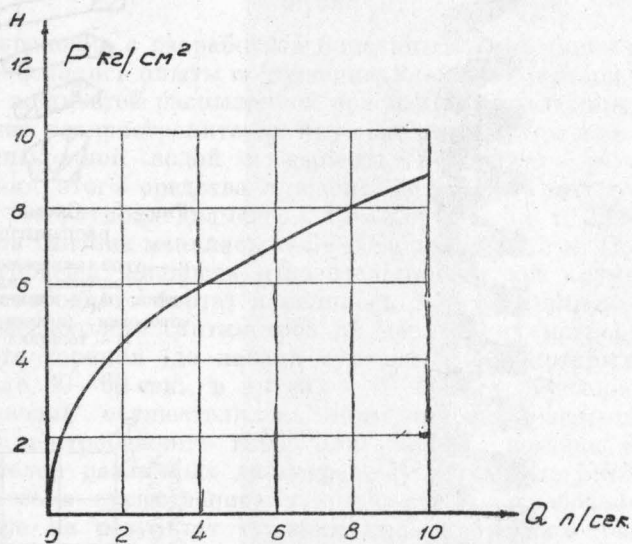


Рис. 3. Характеристика расход — напор центробежного распылителя.

Расход воды из распылителя определяется по общеизвестной формуле

$$Q = \mu F \sqrt{2gH},$$

где μ — коэффициент расхода;

F — площадь сечения входного отверстия;

H — напор у распылителя.

Значения коэффициента расхода в зависимости от диаметра входного отверстия распылителя следующие:

d , мм	43	38	30	19	13
μ	0.83	0.83	0.8	0.75	0.73

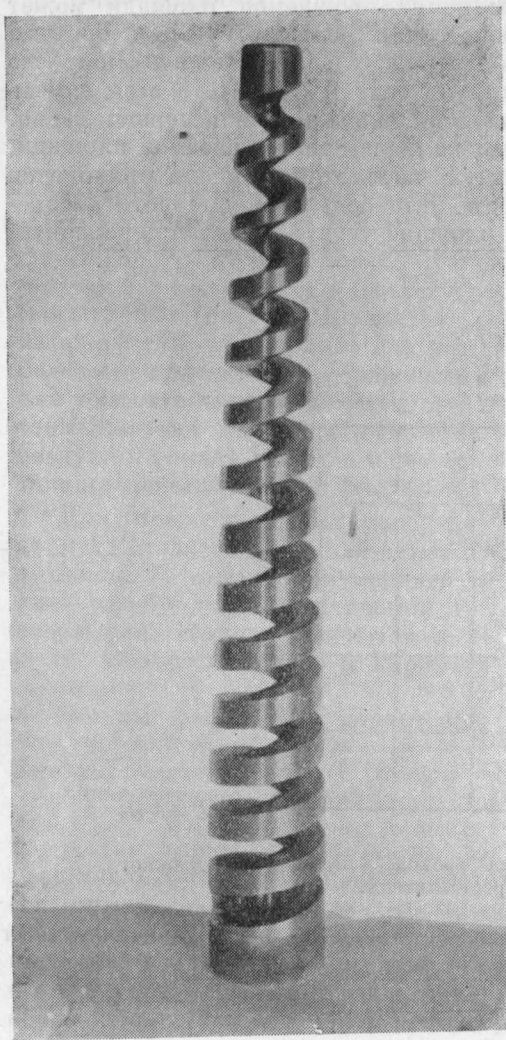


Рис. 4. Винтовой распылитель.

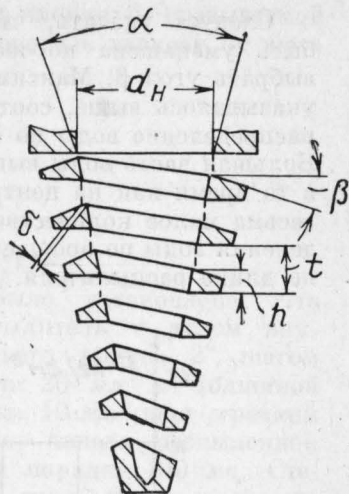


Рис. 5. Схема винтового распылителя.

α — угол внутреннего конуса;
 β — угол скоса винта; t — шаг
 витка; d_H — диаметр входного
 отверстия (диаметр насадки);
 h — толщина витка.

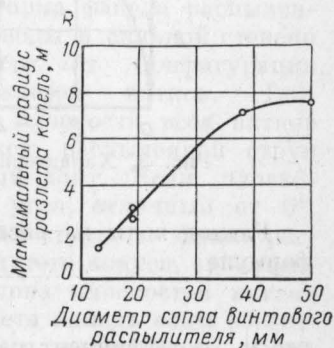


Рис. 6. Зависимость радиуса разлета каплей от диаметра входного отверстия распылителя.

Распылитель, диаметр входного отверстия которого равен 19 мм, обеспечивает тушение пламени бензина в резервуаре площадью 22,5 м², а винтовой распылитель с $d = 30$ мм гасит пламя бензина в резервуаре площадью 60 м². Напор в обоих случаях порядка 8—10 ат.

Винтовой распылитель почти не подвержен засорению, что делает его надежным в работе, имеет малый вес, обеспечивая

сравнительно высокие расходы воды и большую площадь орошения. При помощи винтового распылителя можно также получать распыленную воздушно-механическую пену, вводя с этой целью вместо воды раствор пенообразователя.

Распылитель вводится в горящий резервуар при помощи специальных подъемников, конструкции которых описаны в статье «Комбинированные методы тушения пожаров нефтепродуктов в резервуарах» настоящего сборника.

Тушение пламени бензинов в резервуарах распыленной водой

Одновременно с разработкой описанных выше типов распылителей проводились опыты по тушению пламени бензинов и других горючих жидкостей распыленной водой. Целью этих опытов было стремление распространить на крупные резервуары способ тушения распыленной водой и выявить тактические особенности применения этого средства тушения пожаров. Опыты проводились на резервуарах диаметром 1,3; 2,6; 5,3; 8,6 и 22,5 м. Толщина слоя бензина менялась от 2—3 см до 1,0—1,5 м. Положение уровня горючей жидкости относительно верхней кромки борта (высота свободного борта) изменялось также в широких пределах (от нескольких сантиметров до нескольких метров). Время свободного горения (до начала тушения) в некоторых опытах составляло 30—60 сек., в других — 1—2 часа. Тушение распыленной водой осуществлялось при помощи распылительных головок центробежного типа или же при помощи винтовых распылителей различных диаметров. В результате опытов выяснилось весьма существенное влияние высоты свободного борта резервуара на результат тушения применявшимися распылителями.

Опыты показали, что эффект тушения распыленной водой наступал при некоторой минимальной для данного диаметра резервуара высоте свободного борта h . При высоте борта меньше $h_{\text{мин}}$ тушение распыленной водой не достигалось. При $h > h_{\text{мин}}$ эффект тушения распыленной водой возрастал с увеличением h .

В табл. 2 приведена наименьшая высота свободного борта резервуара, при которой был получен положительный результат тушения бензина распыленной водой для различных резервуаров.

Таблица 2

Диаметр резервуара, м	Высота свободного борта, м	h/D
1.3	0.2	0.153
2.6	0.37	0.142
5.3	0.7	1.132
8.6	1.6	0.186

Если взять отношение минимальной высоты свободного борта резервуара, при которой достигалось тушение, к его диаметру, то, как видно из табл. 2, это отношение для всех резервуаров примерно одного порядка.

Минимальная высота свободного борта, при которой будет обеспечено уверенное тушение распыленной водой, в соответствии с данными табл. 2 может быть выражена приближенной формулой

$$h_{\text{мин}} = 0,15 D, \quad (1)$$

где D — диаметр резервуара.



Рис. 7. Свободное горение бензина в резервуаре диаметром 22,4 м.

При высоте свободного борта меньше $0,15D$ тушение распыленной водой не наступало. Однако и в этом случае пламя настолько прижималось распыленной водой, что у борта резервуара свободно мог стоять человек (рис. 7 и 8). Специально проведенные опыты показали, что скорость выгорания бензина при воздействии распыленной воды сокращалась примерно в 5 раз.

Известно, что некоторые нефтепродукты (бензин, нефть) при длительном их горении в резервуаре образуют прогретый поверхностный слой с высокой температурой — так называемый гомотермический слой. Толщина этого слоя непрерывно нарастает

со временем. Внутри этого слоя происходят интенсивные конвективные течения.

Следовательно, практически при любом пожаре в резервуаре с бензином или нефтью к моменту начала тушения пеной или распыленной водой возникает поверхностный прогретый слой определенной толщины.

Чтобы выяснить условия тушения прогретого бензина (или нефти) распыленной водой, на полигоне ЦНИИПО проводились

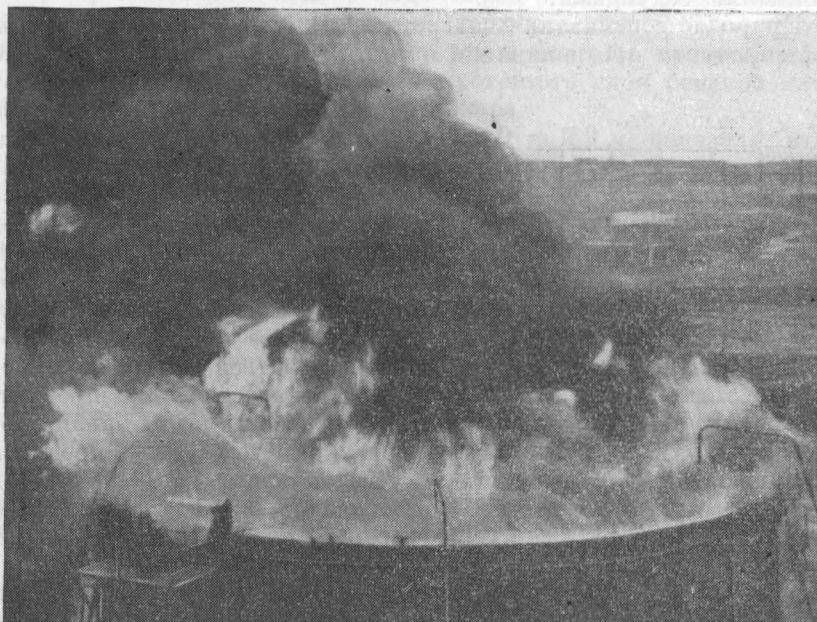


Рис. 8. Под действием распыленной воды из винтовых распылителей интенсивность горения заметно снизилась. У борта резервуара стоит человек.

специальные опыты. Бензин или нефть сжигались в резервуаре $D = 1,3 \text{ м}$, в котором слой горючего составлял примерно 1 м .

Положение уровня жидкости в резервуаре относительно кромки борта в разных опытах было различным. Время свободного горения определялось моментом получения прогретого слоя бензина или нефти заданной толщины, что можно было установить по показаниям термопар, размещенных в различных точках по оси резервуара.

Опыты показали, что тушение распыленной водой запущенного пожара в резервуаре с бензином или нефтью имеет характерные особенности, которые необходимо знать и учитывать при практической работе по тушению подобных пожаров.

Наиболее важной особенностью является то, что в первые же секунды после введения распыленной воды в горящий резервуар наблюдается вскипание горящего бензина или нефти, сопровождающееся иногда переливом через борт резервуара.

Опыты показали, что с увеличением толщины прогретого слоя горючей жидкости мощность таких вскипаний возрастала, т. е. возрастала толщина слоя вспенившегося нефтепродукта и длительность процесса вспенивания, которая исчислялась несколькими секундами.

Природа вспенивания нагретого до высокой температуры нефтепродукта при попадании в него капелек воды пока еще не

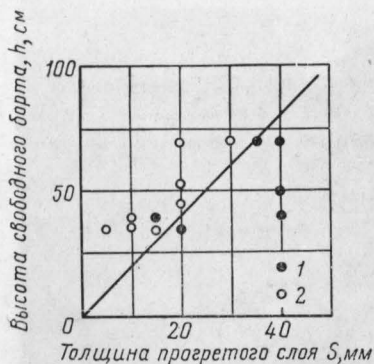


Рис. 9. Влияние высоты свободного борта резервуара на возникновение переливов бензина через борт.

1 — перелив был; 2 — перелива не было.

кается конвективными течениями в прогретом слое нефтепродукта и остается в нем.

Внесенное вместе с каплями воды большое количество центров парообразования в виде пузырьков воздуха или взвешенных твердых частичек вызывает бурное кипение по всей толще прогретого нефтепродукта. Этот процесс кипения будет сопровождаться вспениванием нефтепродукта. Причем высота столба возникшей пены будет зависеть от количества и размеров пузырьков, возникающих в единицу времени с единицы поверхности и от устойчивости пены.

В опытах на полигоне ЦНИИПО тушение пламени бензина производилось при постоянной интенсивности подачи распыленной воды $q = 0,16 \text{ л/сек м}^2$. На рис. 9 точки 2 означают, что при данных условиях (толщине прогретого слоя и высоте свободного борта) перелива через борт не было, т. е. высота слоя пены бензина была меньше взятой высоты свободного борта. Точками 1 обозначены опыты, в которых наблюдался перелив вскипевшего

изучена, но гипотетически этот процесс можно представить себе следующим образом. При введении распыленной воды в факел пламени бензина очень мелкие капельки воды ($d < 100 \text{ мк}$) успевают испариться в факеле пламени, не достигая поверхности жидкости [5]. Капли воды диаметром 200 мк и более не успевают полностью испариться в факеле и попадают в нагретый нефтепродукт. Причем очень крупные капли проходят сквозь толщу нефтепродукта и оседают на дно, производя охлаждение верхнего слоя и подогревание нижнего слоя нефтепродукта.

Основная масса капель воды размерами $100 < d < 500 \text{ мк}$ увлека-

бензина через борт резервуара, т. е. высота слоя пены была больше взятой высоты свободного борта.

Из рис. 9 видно, что толщина слоя пены приблизительно равна удвоенной толщине прогретого слоя.

Если температура прогретого слоя нефтепродукта будет выше 100° , тогда в процессе вспенивания будут интенсивно участвовать пары воды, образующиеся при испарении капелек воды.

Следовательно, чтобы избежать переливания горящего бензина или нефти через борт резервуара при тушении запущенного пожара распыленной водой, надо перед подачей распыленной воды в резервуар снизить уровень горючего так, чтобы высота свободной стенки резервуара более чем в два раза превосходила максимально возможную толщину прогретого слоя бензина или нефти при данной длительности пожара.

Опыты, проведенные на резервуаре $D = 5,3 \text{ м}$, показали, что переливание горящего бензина через борт можно предотвратить также путем периодического введения (на 1—2 сек.) распыленной воды на $\frac{1}{3}$ или $\frac{1}{4}$ поверхности горения в течение 2—3 мин. (рис. 10). В этом случае в перегретый бензин вводится значительно меньше центров парообразования, вскипание протекает менее интенсивно и образовавшаяся пена успевает разрушиться, не переливаясь через борт.

Особенностью процесса тушения запущенного пожара прогреваемых нефтепродуктов в резервуарах распыленной водой является также увеличение времени тушения с увеличением толщины прогретого слоя, т. е. с длительностью пожара. Опыты показали, что после введения распыленной воды в очаг пожара полное тушение наступает только после того, как охладится прогретый слой бензина или нефти.

В первый момент после введения распыленной воды в факел пламени наблюдается отрыв пламени, сопровождающийся хлопком. Затем периодически повторяются вспышки с постепенно убывающей силой до тех пор, пока не будет охлажден поверхностный слой. Это явление объясняется тем, что после введения распыленной воды в факел пламени происходит бурное парообразование. Образовавшееся большое количество водяного пара отрывает пламя и снижает концентрацию паров горючей жидкости. Наступает тушение пламени. Газовая среда быстро охлаждается, вследствие чего большая часть капель воды, продолжающей поступать из распылителя, уже не может испариться, концентрация паров воды постепенно снижается, а концентрация паров горючего увеличивается. Взрывоопасная концентрация паров нефтепродукта снова восстанавливается, и горючая смесь снова поджигается каким-либо участком стенки борта, еще не успевшим остыть. Происходит вспышка. Пламя снова вызывает интенсивное испарение капель воды и процесс повторяется до тех пор, пока весь прогретый слой нефтепродукта не будет охлажден.

Во всех руководствах и указаниях по тушению нефтепродуктов в резервуарах говорится о необходимости в первую оче-

редь организовать охлаждение горящего резервуара и соседних с ним. Это совершенно правильное указание диктовалось стремлением предотвратить деформацию и разрушение стенок горящего резервуара. Однако, кроме предотвращения деформации стенок, охлаждение их струями воды оказывает определенное влияние

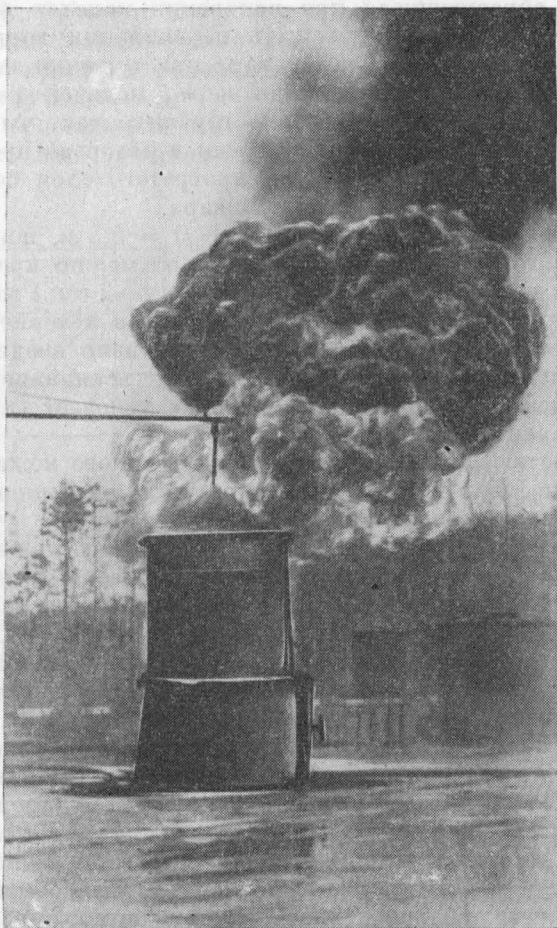


Рис. 10. Тушение пламени бензина при помощи винтового распылителя.

на процесс прогрева нефтепродукта при его горении, а также на процесс тушения распыленной водой.

Было установлено, что охлаждение стенок струями воды, организованное определенным образом, тормозило образование прогретого слоя в бензине и нефти [9] и, следовательно, облегчало условия для тушения распыленной водой и пеной. Однако, как

об этом говорилось выше, охлажденные стенки при тушении распыленной водой не дадут нужного количества водяного пара и не будут способствовать успешному тушению. В 1957 г. на полигоне ЦНИИПО проводились опыты по изучению влияния охлаждения стенок резервуара струями воды на процесс горения и тушения бензина. Для исключения влияния ветра и других метеорологических условий опыты проводились одновременно на двух одинаковых резервуарах $D = 1,3$ м при одинаковых условиях. Один из этих резервуаров охлаждался водой через оросительное кольцо, другой резервуар не охлаждался. Оросительное кольцо было предварительно оттарировано по расходу воды в зависимости от напора. Результаты этих опытов сведены в табл. 3.

Таблица 3

№ опыта	Высота свободного борта, мм	Резервуар с охлаждением				Резервуар без охлаждения		
		толщина прогретого слоя, мм	время прогрева, мин.	температура в прогретом слое, °С	расход воды на охлаждение, л/м·сек	толщина прогретого слоя, мм	время прогрева, мин.	температура в прогретом слое, °С
34	700	400	37	95	1,00	400	80	105
35	700	Не прогр.	74	—	1,22	100	57	100
36	700	То же	159	—	1,22	300	107	140
37	700	300	30	100	0,60	300	54	130
38	700	400	38	110	0,31	400	63	100
40	70	Не прогр.	38	—	0,88	400	30	90
41	70	То же	41	—	0,25	400	28	110
42	70	»	41	—	0,10	400	32	110

Из табл. 3 видно, что в тех опытах, где высота свободного борта была небольшая (70 мм) и струи воды для охлаждения подавались на уровне бензина в резервуаре, охлаждение водой действительно прекращало прогрев бензина. Но совершенно противоположный результат дали те опыты, в которых уровень бензина был ниже борта на 700 мм, а вода для охлаждения подавалась у верхней части борта. При этом охлаждение стенок водой не только не прекратило прогрев бензина, но, наоборот, прогрев бензина ускорился почти в два раза. Это явление может быть объяснено тем, что вода, стекающая по прогретой стенке борта, нагревается до температуры 90—100°. Омывая затем стенку резервуара, лежащую ниже уровня горючей жидкости, горячая вода отдает свое тепло и нагревает эту часть борта до 90—100°. Работами В. И. Блинова и Г. Н. Худякова доказано, что в этом случае обычно начинается кипение в пристеночной области в тех многофракционных жидкостях, температура начала кипения которых достаточно низкая (бензин) [10]. Пузырьки пара нефтепродукта, возникающие на стенке, поднимаясь вверх, создают интенсивно перемешиваемый прогретый слой.

Чтобы устранить это явление, как показали опыты, требуется резко увеличить интенсивность охлаждения стенки резервуара (см. табл. 3). Таким образом, неправильно организованное охлаждение стенок горящего резервуара с бензином или легкой нефтью может привести к ускоренному образованию прогретого поверхностного слоя и сильно осложнит процесс тушения пожара. Как показали опыты, при тушении пламени распыленной водой за 2—3 мин. перед подачей распыленной воды в резервуар охлаждение стенок целесообразно прекратить. В этом случае нагретая стенка будет способствовать бурному парообразованию и создаст благоприятные условия для тушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вермишев Н. А. Огнегасительные свойства кипящей воды и получение ее на пожаре при пульверизации холодной воды. Доклад на заседании НРТО 26 марта 1903 г.

2. Цлаф Л. Я. и Зотикова А. Н. Тушение легко воспламеняющихся жидкостей в стационарных наземных емкостях распыленной водой. Отчет ЦНИИПО, 1940.

3. Росбах В. и Роговский З. Тушение пожаров горючих жидкостей водяными струями. Chemistry and Industry, VI, № 24, 1954.

4. Антонов Н. М. и Лабеев Н. Ф. Исследование способа тушения пожаров нефтепродуктов высокодиспергированной сжатым воздухом (аэрированной) водой. Отчет ЦНИИПО, 1956.

5. Блинов В. И., Худяков Г. Н., Петров И. И. О механизме тушения горения нефтепродуктов распыленной водой. Информационный сборник ЦНИИПО, 1958.

6. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. Гостехтеориздат, М., 1953.

7. Герасимов В. А. Изучение влияния геометрических размеров центробежного распылителя на его гидравлические и другие параметры. Информационный сборник ЦНИИПО, 1958.

8. Fire Engineering, 1949. November, vol. 102, No. 11, 866—87.

9. Павлов П. П. и Хованова А. М. Влияние охлаждения стенок резервуара на горение и тушение нефтепродуктов. Информационное письмо Бакинской лаборатории ЦНИИПО, 1956.

10. Блинов В. И. и Худяков Г. Н. К вопросу о распределении температуры в нефтепродуктах, сгорающих в цилиндрических резервуарах. Информационное письмо № 7. ЭНИН АН СССР, 1958.

В. А. ГЕРАСИМОВ, И. И. ПЕТРОВ, В. Ч. РЕУТТ,
Р. М. ЦЫГАН, Л. К. ЯГУБЯН

Инженеры

КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ В РЕЗЕРВУАРАХ¹

Самым распространенным средством тушения пожаров нефтепродуктов в резервуарах в настоящее время являются химическая и воздушно-механическая пены, механизм тушащего действия которых достаточно хорошо изучен [1, 2, 3]. Процесс тушения пенами как бы распадается на две стадии. В первой стадии пена, попадая на поверхность горящей жидкости, производит охлаждение поверхности за счет воды, выделяющейся при разрушении пены. По мере охлаждения поверхностного слоя уменьшается разрушение пены и вступает в силу изолирующий фактор, т. е. способность пены задерживать пары нефтепродукта. Торможение процесса испарения является решающим условием для тушения пожаров нефтепродуктов пеной.

Однако практически тушение пожаров бензина и сырой нефти пеной мало эффективно. Исследованиями [1, 2] установлено, что причиной низкой эффективности пены является образование в этих нефтепродуктах прогретого слоя, имеющего температуру 100—120° для бензина и 180—240° для нефти. Прогретый слой горячей жидкости, который возникает вследствие конвективных токов, развивающихся в толще жидкости, способствует интенсивному разрушению и потере изолирующей способности пены.

Чтобы создать условия для применения пены, необходимо, очевидно, использовать комбинированный метод тушения [3, 5], при котором вначале охлаждается прогретый слой, а затем на сравнительно холодную поверхность подается пена. Охлаждение прогретого слоя может быть осуществлено различными способами, например, перемешиванием горячей жидкости или распыленной водой. В статье рассматриваются физические основы комбинированного метода тушения: «распыленная вода — воздушно-механическая пена», а также дано описание соответствующей аппаратуры.

¹ В опытах принимали участие В. В. Самсонов, Н. П. Сучкова, В. Е. Жабин.

Поведение воздушно-механической пены, нанесенной на поверхность горючей жидкости

В результате экспериментальных работ, проделанных в последние годы [1, 2, 3], можно считать доказанным, что изолирующее действие пены, т. е. способность пены притормаживать испарение горючей жидкости, является решающим фактором ее огнетушащего действия. Охлаждение верхнего слоя жидкости каплями раствора пенообразователя, выделяющимися вследствие разрушения пены, также способствует в значительной степени успешному тушению пенами. Однако этот фактор следует считать второстепенным по отношению к изолирующей способности пены, хотя бы уже потому, что в подавляющем большинстве случаев тушение пламени наступает при более высокой температуре жидкости, чем температура ее воспламенения.

Изолирующая способность пены определяется скоростью диффузии паров горючей жидкости сквозь жидкие пленки пены и воздушные полости ее пузырьков. В. И. Блиновым и Г. Н. Худяковым отчетливо доказано, что «...скорость испарения жидкости, находящейся под слоем пены, в несколько десятков раз меньше скорости испарения той же жидкости со свободной поверхности» [1]. Они особенно подчеркивают, что испарение жидкости под пеной идет медленно потому, что мала скорость диффузии пара через пленки пены; эти пленки в основном и тормозят испарение жидкости под слоем пены.

Следовательно, если слой пены покрывает всю поверхность горючей жидкости, то вследствие резкого уменьшения скорости испарения горение должно прекратиться. Однако практика показывает, что при некоторых условиях горение жидкости не прекращается даже тогда, когда поверхность горючего полностью покрыта слоем пены. Дело здесь, очевидно, не в том, что ухудшаются изолирующие свойства пены, а в том, что при определенных условиях имеет место прорыв паров горючей жидкости сквозь слой пены, связанный с разрушением ячеек пены вблизи свободной поверхности горючего. На это обстоятельство указывают В. И. Блинов и Г. Н. Худяков в работе [1]: «Сгорание жидкости будет протекать только в том случае, если пары прорываются через слой пены».

Таким образом, огнетушащее действие пены в некоторых условиях оказывается в значительной степени зависящим от способности пены противостоять разрыву под действием паров горючей жидкости. В связи с этим представляет интерес установить причины прорыва и его механизм. В настоящей статье сделана попытка объяснить указанное явление.

Суждение об условиях прорыва пенного слоя можно получить, если схематизировать явление конкретной физической моделью, учитывающей наиболее существенные стороны рассматриваемого процесса. Одна из многих вероятных моделей может быть построена на основе следующих соображений.

Процесс разрушения пены, находящейся на поверхности жидкости, протекает как в толще пенного слоя, так и вблизи границы раздела пена — горючая жидкость. Причем в последнем случае пена разрушается, по-видимому, так, что на поверхности горючей жидкости образуются газовые полости, появившиеся вследствие разрушения нижней стенки пузырька пены (рис. 1, а). Разрушение нижней стенки пузырька пены приводит к тому, что горючая жидкость оказывается в непосредственном контакте с газом, наполняющим пузырьки пены.

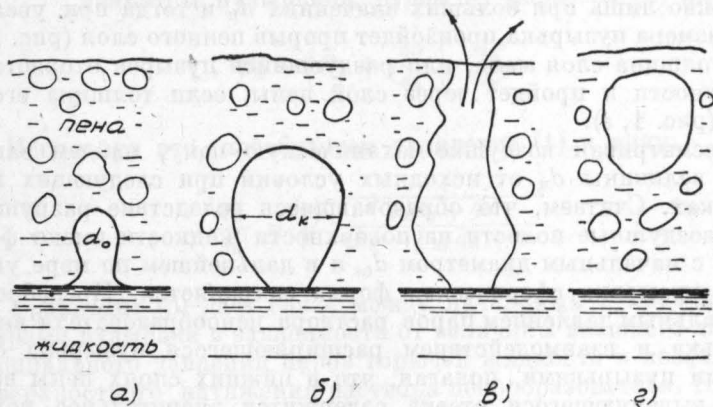


Рис. 1. Образование пузырьков воздуха при больших расходах воздуха. Показан один период.

Оставляя в стороне вопрос о том, в силу каких причин разрушается нижняя стенка пузырька пены, находящегося вблизи поверхности горючего, мы можем утверждать, что образование газовых полостей является необходимым условием прорыва паров жидкости сквозь слой пены, поскольку парообразование возможно лишь в системе газ — жидкость.

Появление на поверхности горючей жидкости газовых полостей может быть обязано не только процессу разрушения пены вблизи границы раздела, но и другим причинам, связанным, например, с явлением вскипания, когда самопроизвольно образуется огромное количество пузырьков, наполненных парами раствора пенообразователя и горючего. Эта возможность будет подробнее обсуждена далее, а пока будем считать, что образование пузырьков, соприкасающихся с горючей жидкостью, происходит в результате разрушения пены.

С момента возникновения границы раздела газ — жидкость в образовавшуюся полость начинается испарение горючего, сопровождающееся увеличением размеров пузырька. Раздувание пузырька будет происходить до тех пор, пока внутри его парциальное давление паров жидкости не достигнет давления насыщенных паров. При этом размеры пузырька должны принять какое-то конечное значение, которое в случае сферы будет равно

d_k . Величина конечного размера пузырька определяется его начальным размером d_0 , давлением насыщенных паров горючего при данной его температуре и физико-химическими свойствами пены.

Очевидно, в зависимости от соотношения указанных причин конечный размер пузырька может быть по сравнению с толщиной пенного слоя небольшим, и тогда пузырек останется внутри пенного слоя, т. е. прорыва паров горючего не произойдет (рис. 1, б). В другом случае может оказаться, что равновесное состояние возможно лишь при больших значениях d_k и тогда при увеличении размера пузырька произойдет прорыв пенного слоя (рис. 1, в), если толщина слоя мала, или раздувшийся пузырек оторвется от поверхности и пройдет через слой пены, если толщина его велика (рис. 1, г).

Рассматривая воздушно-механическую пену, найдем зависимость величины d_k от исходных условий при следующих предположениях. Считаем, что образовавшиеся вследствие разрушения пены воздушные полости на поверхности жидкости имеют форму сферы с начальным диаметром d_0 , и в дальнейшем по мере увеличения пузырька сферическая форма сохраняется. Пренебрегаем парциальным давлением паров раствора пенообразователя внутри пузырька и взаимодействием расширяющегося пузырька с соседними пузырьками, полагая, что в нижних слоях пены вследствие выделяющегося отсека содержится значительное количество свободного раствора, так что расстояния между соседними пузырьками достаточно велики.

Исходя из перечисленных предпосылок, условие равновесия для раздувшегося пузырька можно записать в следующей форме:

$$P_v + P_n = P_a + \frac{4\sigma}{d_k}, \quad (1)$$

где P_v — парциальное давление воздуха внутри пузырька;
 P_n — парциальное давление насыщенных паров горючей жидкости;

σ — коэффициент поверхностного натяжения раствора пенообразователя;

d_k — конечный диаметр пузырька;

P_a — внешнее давление, которое складывается из суммы атмосферного давления и статического давления вышележащего столба пены.

Парциальное давление воздуха можно выразить через величины, определяющие начальное состояние пузырька, если использовать известное равенство:

$$P_v V_k = P_{0v} V_0, \quad (2)$$

где P_v — парциальное давление воздуха в увеличившемся пузырьке;

V_K — объем пузырька после расширения;
 P_{0B} — давление воздуха в начальном пузырьке;
 V_0 — начальный объем пузырька.

Подставляя вместо величины P_{0B} очевидное равенство

$$P_{0B} = P_a + \frac{4\sigma}{d_0}, \quad (3)$$

где d_0 — начальный диаметр пузырька, и выразив объемы через диаметры пузырьков, будем из формулы (2) иметь

$$P_B = \left(P_a + \frac{4\sigma}{d_0} \right) \cdot \frac{d_0^3}{d_K^3}. \quad (4)$$

Используя это, преобразуем уравнение (1) к виду:

$$\frac{d_K}{d_0} = \sqrt[3]{\frac{P_a d_0 + 4\sigma}{(P_a - P_H) d_K + 4\sigma}}. \quad (5)$$

Уравнение (5) дает связь между начальным и конечным диаметрами пузырька в зависимости от величины внешнего давления, парциального давления паров горючей жидкости и коэффициента поверхностного натяжения раствора пенообразователя. На основе этого уравнения представляется возможным сделать некоторые заключения о сопротивляемости пенного слоя прорыву паров горючей жидкости.

Исходя из вышеприведенных предположений о механизме прорыва пенного слоя, мы можем судить о возможности прорыва по значению величины d_K/d_0 , которая представляет собой отношение конечного диаметра раздувшегося пузырька к его начальному диаметру. Это отношение может быть вычислено из формулы (5), если известны величины σ , P_H , P_a , d_0 . Последние могут быть определены опытным путем или просто заданы, причем величина d_0 в этом случае будет представлять собой средний размер пузырьков полидисперсной пены, определенный тем или иным путем.

Безразмерная величина d_K/d_0 , значение которой для данных условий известно, позволяет предсказать поведение пены в этих условиях. Так, например, если окажется, что d_K/d_0 очень велико, то это свидетельствует о плохой сопротивляемости пены прорыву паров, и наоборот, если отношение d_K/d_0 близко по значению к единице, то, очевидно, сопротивляемость пенного слоя велика. Таким образом, величина d_K/d_0 может служить критерием прочности пены по отношению к прорыву паров горючей жидкости.

Как следует из (5), величина d_K/d_0 зависит от разности внешнего давления P_a и давления насыщенных паров горючей жидкости P_H . Величина P_H в свою очередь зависит от температуры жидкости.

Когда температура жидкости низка по сравнению с температурой ее кипения, т. е. разность $P_a - P_n$ имеет довольно высокие значения, уравнение (5) можно упростить, отбрасывая члены, содержащие σ , которые малы по сравнению с другими членами. Тогда будем иметь приближенное равенство:

$$\frac{d_k}{d_0} \approx \sqrt[3]{\frac{P_a}{P_a - P_n}}. \quad (6)$$

Отсюда следует, что при нанесении пены на поверхность сравнительной холодной горючей жидкости прорыв пенного слоя маловероятен, так как P_n мало по сравнению с P_a и величина критерия d_k/d_0 по численному значению близка к единице. Важно подчеркнуть также, что в этом случае сопротивляемость пенного слоя прорыву паров горючей жидкости почти не зависит от структурных и физико-химических свойств пены, так как в формулу (6) входят только величины внешнего давления и парциального давления паров горючего.

При приближении температуры жидкости к температуре ее кипения парциальное давление P_n резко возрастает, т. е. разность $P_a - P_n$ становится очень малой. Это позволяет в уравнении (6) отбросить член, содержащий эту разность, и тогда относительное увеличение размера пузырька будет равно

$$\frac{d_k}{d_0} \Big| \approx \sqrt{1 + \frac{P_a \cdot d_0}{4\sigma}}. \quad (7)$$

Если при низких температурах жидкости прочность пены по отношению к прорыву паров горючего почти не зависит от свойств самой пены, то при высоких температурах на первый план выступают физические и структурные свойства пены. Как следует из формулы (7), критерий d_k/d_0 определяется безразмерным комплексом

$$\frac{P_a d_0}{\sigma}. \quad (8)$$

Этот комплекс представляет собой отношение двух сил — силы внешнего давления P_a к силе капиллярного давления σ/d_0 . Чем больше капиллярные силы, тем меньше комплекс (8) и тем меньше, следовательно, величина d_k/d_0 , т. е. тем больше сопротивляемость пены по отношению к прорыву паров горючего. Величина внешнего давления P_a представляет собой сумму атмосферного давления и статического давления слоя пены и меняется, очевидно, в сравнительно узких пределах; P_a практически может быть принято равным атмосферному давлению. Следовательно, возможность прорыва паров горючего сквозь пенный слой при температуре жидкости, близкой к температуре ее кипения, определяется в основном капиллярными силами σ/d_0 . В связи с этим прочность пенного слоя по отношению к прорыву паров горючего целесообразно характеризовать комплексом (8).

В табл. 1 приведены значения безразмерного комплекса (8) для различных воздушно-механических пен, из которой видно, что при одинаковой степени дисперсности пена на основе пенообразователя «Пиротокс» обладает более высокой капиллярной прочностью, чем пена на основе ПО-6 и особенно на основе ПО-1.

Таблица 1

Пена на основе пенообразователя	Концентрация, %	$\sigma \cdot 10^6$, кг/см	$\frac{P_a d_0}{\sigma} \cdot 10^2$
«Пиротокс»	3,5	55,7	1,8
ПО-6	4,0	50,4	2,0
ПО-1	4,0	34,0	2,9

На рис. 2 показано изменение числа d_k/d_0 для пены, полученной на основе пенообразователя ПО-1 при концентрации 4%, в зависимости от разности $P_a - P_v$, где в качестве горючей

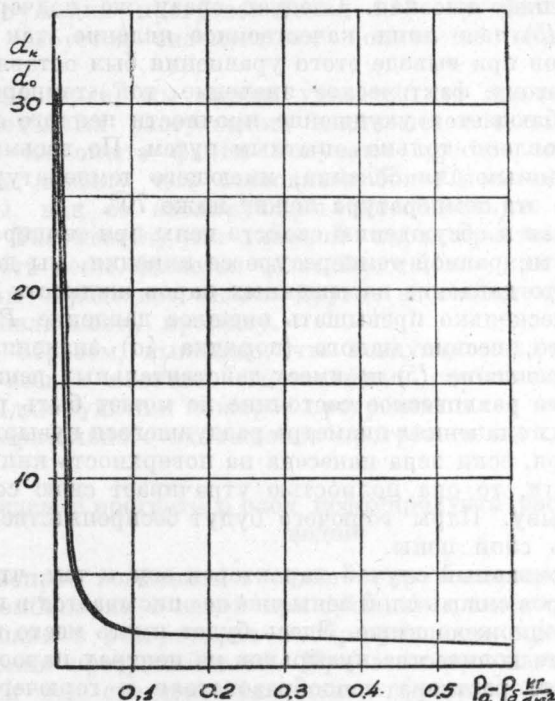


Рис. 2. Зависимость относительного увеличения размеров пузырька пены от разности внешнего давления и парциального давления бензина.

жидкости взят бензин с парциальным давлением P_0 . Эта зависимость наглядно показывает, что имеются две области изменения величины d_k/d_0 , в каждой из которых характер зависимости

относительного увеличения размеров пузырька пены различен. Пологий участок кривой соответствует малым значениям парциального давления бензина, т. е. низкой его температуре, и описывается формулой (6). При высокой температуре бензина величина d_k/d_0 резко возрастает, — в ходе кривой намечается как бы излом. Это означает, что прочность пенного слоя по отношению к прорыву паров горючего при высоких температурах резко падает. При температуре жидкости, весьма близкой к температуре ее кипения, сопротивляемость пены разрыву полностью определяется капиллярной прочностью пены σ/d_0 .

Таким образом, при некоторой температуре жидкости сопротивляемость пенного слоя разрыву резко ухудшается. Подсчеты для случая, показанного на рис. 2, дают численное значение разности температуры кипения бензина и температуры, при которой наблюдается излом в ходе кривой, равное примерно 5° ; т. е. если бензин имеет температуру не менее чем на 5° ниже температуры его кипения, то сопротивляемость пенного слоя разрыву будет довольно высокая. Следует сразу же подчеркнуть, что уравнение (5) дает лишь качественное явление, так как целый ряд факторов при выводе этого уравнения был оставлен без внимания. Поэтому фактическое значение той температуры, при которой наблюдается ухудшение прочности пенного слоя, может быть установлено только опытным путем. По весьма неполным опытным данным для бензина, имеющего температуру кипения около 100° , эта температура лежит ниже 70° .

Приступая к обсуждению свойств пены при температуре горючей жидкости, равной температуре ее кипения, мы должны подчеркнуть, что давление насыщенных паров жидкости в этом случае будет несколько превышать внешнее давление P_a . Начиная с некоторого, весьма малого (порядка 4σ) значения разности $P_a - P_n$, уравнение (5) не имеет действительных решений, а это означает, что равновесное состояние не может быть реализовано ни при каких значениях диаметра раздувшегося пузырька пены d_k . Иначе говоря, если пена нанесена на поверхность кипящей горючей жидкости, то она полностью утрачивает свою сопротивляемость разрыву. Пары горючего будут беспрепятственно проходить сквозь слой пены.

Рассматриваемый случай характерен еще и тем, что механизм прорыва паров сквозь слой пены уже не описывается в полной мере так, как предложено выше. Здесь будет иметь место возникновение большого количества пузырьков на центрах парообразования при контакте раствора пенообразователя и горючего. Причем, если температура кипения жидкости выше температуры кипения раствора пенообразователя, то пузырьки возникают и вследствие кипения раствора, что наблюдается на практике, как явление вскипания и перелива нефтепродукта.

В связи с резкой температурной зависимостью сопротивляемости пены прорыву паров горючего становится более ясным охлаждающее действие пены. Пена, выделяя отсек, охлаждает

нагретый поверхностный слой жидкости и тем самым сама подготавливает условия, в которых наиболее эффективно проявляются ее свойства сопротивляемости прорыву. Действительно, с одной стороны, вследствие охлаждения жидкости пена медленнее разрушается, т. е. уменьшается число газовых полостей, соприкасающихся с поверхностью жидкости, с другой стороны, если даже эти полости возникают, то к этому моменту парциальное давление паров горючего становится небольшим, и прорыва пенного слоя не происходит. Для нефтепродуктов, образующих в процессе свободного горения прогретый слой, охлаждение этого слоя выделяющимся из пены раствором малоэффективно ввиду большой тепловой емкости слоя и малого количества отсека. Следовательно, пена, находящаяся на прогретом слое, будет интенсивно разрушаться, образуя на границе раздела пена — жидкость большое количество газовых полостей, которые вследствие высокого парциального давления паров горючего будут увеличиваться и прорывать пенный слой. Все это приводит к тому, что для тушения прогреваемых нефтепродуктов, например бензина, требуется значительное количество пенообразующих средств.

Подводя итоги, мы можем указать, что значение и смысл вышеприведенных рассуждений заключается в том, что ранее известные из опыта факты получают простое математическое выражение, в силу чего становятся более ясными такие свойства пены, как ее изолирующая способность и охлаждающее действие. Разумеется, что главной характеристикой огнегасящих свойств пены является ее стойкость, так как именно стойкость пены определяет многие другие ее свойства, в том числе и сопротивляемость прорыву.

Таким образом, выяснено, что воздушно-механическая пена обладает весьма низкими огнегасящими свойствами, если применять ее для тушения пожаров прогреваемых нефтепродуктов без предварительного охлаждения прогретого слоя.

Охлаждение прогретого слоя нефтепродукта распыленной водой

Этот вопрос возникает в связи с применением распыленной воды в комбинации с пеной при тушении пламени нефтепродуктов, горящих в резервуарах и образующих в процессе свободного горения прогретый слой. При этом распыленная вода используется как средство охлаждения прогретого слоя жидкости с целью подготовки наиболее благоприятных температурных условий для пены.

С практической точки зрения задача сводится к тому, чтобы установить связь между температурой, которую принимает нефтепродукт после охлаждения, и временем охлаждения в зависимости от интенсивности подачи распыленной воды, времени свободного горения, температуры прогретого слоя и т. д.

Связь между указанными величинами зависит от механизма переноса тепла и начального распределения температуры по толщине слоя нефтепродукта.

Перенос тепла происходит так, что капли воды, попавшие в жидкость, вначале нагреваются, затем по мере погружения вглубь жидкости охлаждаются, вследствие чего по всей массе жидкости происходит перераспределение температуры. Расчеты, произведенные для случая падения в жидкости одиночных капель воды, показывают, что капли небольших размеров сравнительно быстро принимают температуру окружающей среды. Так, например, капля воды размером 500 мк принимает температуру бензина, пройдя в нем путь, приблизительно равный 3 см, а капля размером 100 мк — 0,05 см.

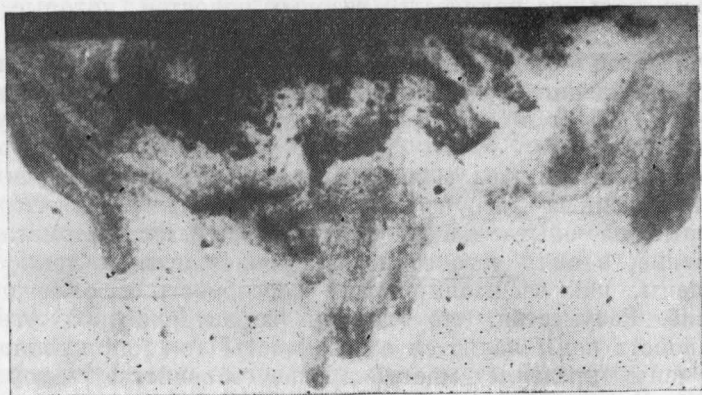


Рис. 3. Движение капель распыленной воды в трансформаторном масле (по Худякову Г. Н.).

Эти расчеты сделаны при условии, что температура жидкости, в которой движется капля, остается постоянной. Это положение справедливо только для одиночной капли. При движении в жидкости большого числа капель температура среды изменяется, что и является целью применения распыленной воды в рассматриваемом случае.

Кроме того, характер движения одиночной капли отличается от характера движения той же капли, но движущейся со многими другими каплями одновременно.

На рис. 3 показано движение большого количества капель воды в трансформаторном масле. Хорошо видно, что падение капель сопровождается значительными возмущениями в жидкости, причем, мелкие капли, по-видимому, увлекаются развивающимися в жидкости конвективными токами.

Сложный характер движения совокупности капель в слое нефтепродукта, а также изменение температуры среды, связан-

ное с изменением температуры капель, делают невозможным применение расчетных зависимостей, полученных для одиночной капли. Однако эти зависимости не являются бесполезными и дают указание на то, что мелкие капли весьма быстро принимают температуру окружающей среды. Приступая к анализу опытов по охлаждению прогретого слоя бензина распыленной водой, важно подчеркнуть именно это обстоятельство.

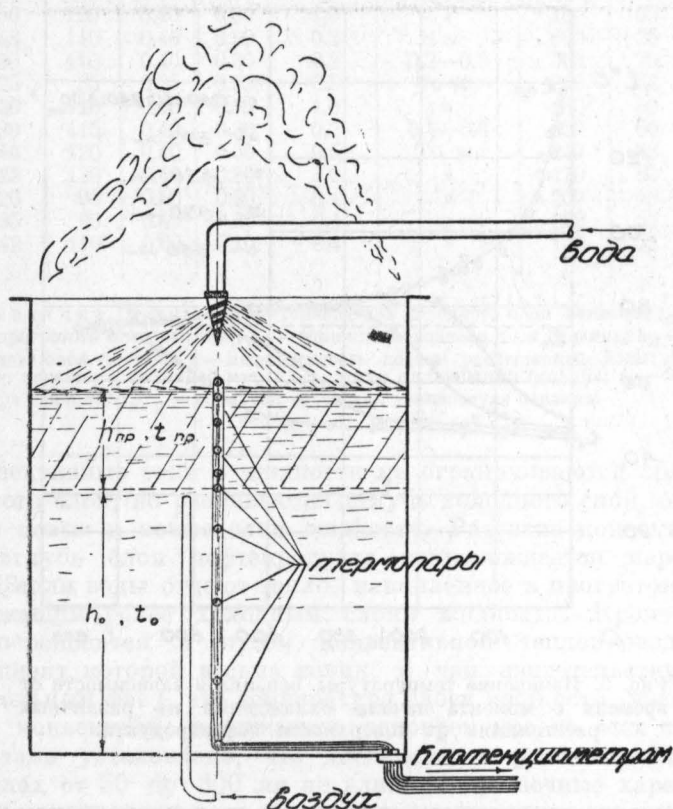


Рис. 4. Схема опытной установки.

Опыты проводились на резервуаре диаметром 1,3 м. Схема опытной установки показана на рис. 4. Температура жидкости измерялась при помощи хромель-алюмелевых термомпар, расположенных по вертикальной оси резервуара на различных расстояниях от зеркала жидкости. Уровень бензина поддерживался постоянным. Распыленная вода подавалась из распылителя таким образом, что основная масса воды попадала непосредственно в бензин, не орошая стенок резервуара.

Результаты опытов сведены в табл. 2.

На основе анализа этих опытов процесс охлаждения прогретого слоя нефтепродукта можно представить себе следующим образом.

При прохождении капель распыленной воды сквозь слой нефтепродукта в последнем наблюдается перераспределение тепла — температура прогретого слоя понижается, холодного — повышается (рис. 5).

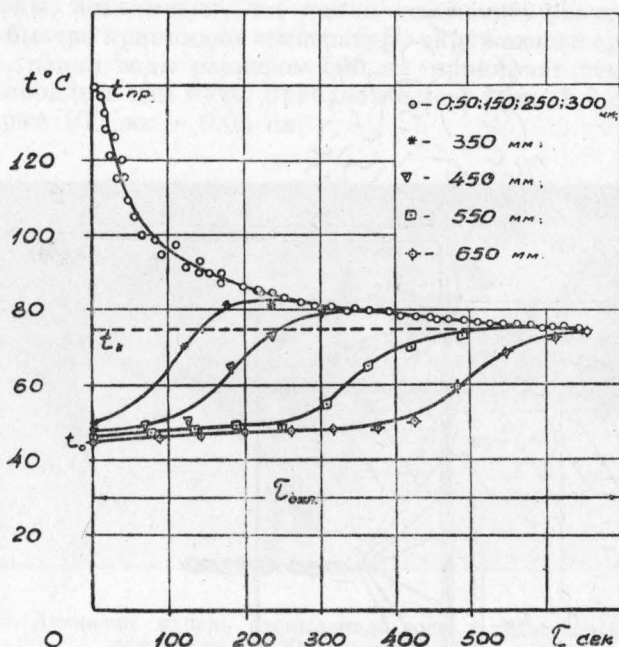


Рис. 5. Изменение температуры бензина в зависимости от времени с момента начала охлаждения на различных расстояниях от поверхности нефтепродукта.

Понижение температуры прогретого слоя происходит одновременно во всех точках слоя. Это объясняется, по-видимому, тем, что в прогретом слое уже до подачи воды происходят интенсивные конвективные движения жидкости, которые усиливаются при прохождении сквозь слой большого количества капель. Причем усиление конвекции вызывается, вероятно, не только механическим взаимодействием между средой и каплями, но и гравитационной конвекцией, возникающей вследствие разности температур уже охлажденных областей прогретого слоя и еще горячих. Конвективные токи способствуют интенсивному теплообмену между близлежащими слоями жидкости так, что местные градиенты температуры, вызванные неравномерным охлаждением, весьма быстро сглаживаются.

Таблица 2

№ опы- тов	t_0 , °C	t_{Π} , °C	h_0 , м	h_{Π} , м	q , л/м, сек	d , мм	τ_0 , сек.	t_K , °C	$t_{K.p}$, °C
1	32	120	0,35	0,35	0,2	0,05—0,1	550	70	64
2	46	130	0,40	0,30	0,5	То же	240	70	69
3	50	120	0,40	0,30	1,0	»	180	65	62
4	48	140	0,40	0,30	0,2	»	600	75	73
5	30	110	0,40	0,30	0,2	0,2—0,3	550	70	57
6	25	85	0,35	0,35	0,5	То же	210	52	48
7	30	110	0,40	0,30	1,0	»	160	60	54
8	30	115	0,40	0,30	0,2	0,4—0,8	550	60	58
9	46	120	0,40	0,30	0,5	То же	240	68	66
10	25	130	0,40	0,30	1,0	»	170	60	57
11	20	90	0,50	0,20	0,4	»	200	40	37
12	35	90	0,40	0,30	0,4	»	260	55	53
13	42	110	0,60	0,10	0,4	»	140	55	47

Примечание. В табл. 2: t_0 — температура холодного слоя бензина; t_{Π} — температура прогретого слоя бензина; h_0 — толщина холодного слоя бензина; h_{Π} — толщина прогретого слоя бензина; q — интенсивность подачи распыленной воды; d — средний размер капель распыленной воды; τ_0 — время охлаждения бензина; t_K — конечная температура бензина; $t_{K.p}$ — конечная расчетная температура бензина.

Конвективные токи в жидкости не ограничиваются областью прогретого слоя, но развиваются вглубь холодного слоя, охватывая все новые и новые слои жидкости. Развитие конвективных токов вглубь слоя нефтепродукта сопровождается переносом тепла. Капли воды отдают тепло, накопленное в прогретом слое, нижележащим более холодным слоям жидкости. Кроме того, тепло переносится и путем конвективной теплопроводности, коэффициент которой весьма велик, о чем свидетельствует тот замечательный факт, что температура слоев жидкости, уже охваченных конвекцией, понижается одновременно во всех точках.

Опытами установлено, что дисперсность распыленной воды в пределах от 50 до 800 мк не влияет на конечные характеристики — время охлаждения и конечную температуру нефтепродукта (см. табл. 2). Этот факт объясняется вышеупомянутым обстоятельством, что капли воды весьма быстро принимают температуру среды. Естественно, что мелкие капли обладают этим свойством в большей степени, чем капли крупные. Но поскольку путь движения капель в слое жидкости очень велик по сравнению с размерами самих капель, то разница в скорости нагрева и охлаждения крупных и мелких капель на этом пути сглаживается и не имеет существенного значения для всего процесса в целом.

Принимая во внимание это обстоятельство, а также и то, что температура всего слоя нефтепродукта к концу охлаждения становится одинаковой во всех его точках, связь между величинами h_{Π} , t_{Π} , h_0 , t_0 , t_K , q , τ_0 можно установить на основе простых

соображений о тепловом балансе процесса, который можно представить в форме уравнения:

$$Q_{\text{п}} = Q_0 + Q_{\text{в}}, \quad (9)$$

где $Q_{\text{п}}$ — тепло, отданное прогретым слоем охлаждающей воде и холодным слоям нефтепродукта за время охлаждения;

Q_0 — тепло, полученное холодным слоем;

$Q_{\text{в}}$ — тепло, полученное распыленной водой.

Величины $Q_{\text{п}}$, Q_0 , $Q_{\text{в}}$ равны:

$$Q_{\text{п}} = F h_{\text{п}} \gamma_{\text{н}} C_{\text{н}} (t_{\text{п}} - t_{\text{к}}); \quad (10)$$

$$Q_0 = F h_0 \gamma_{\text{н}} C_{\text{н}} (t_{\text{к}} - t_0); \quad (11)$$

$$Q_{\text{в}} = F q \tau_0 C_{\text{в}} \gamma_{\text{в}} (t_{\text{к}} - t_{0\text{в}}), \quad (12)$$

где $\gamma_{\text{н}}$ — удельный вес нефтепродукта;

$C_{\text{н}}$ — теплоемкость нефтепродукта;

F — площадь зеркала горения;

$C_{\text{в}}$ — теплоемкость воды;

$\gamma_{\text{в}}$ — удельный вес воды;

$t_{0\text{в}}$ — начальная температура воды.

Подставляя уравнения (10), (11), (12) в (9), найдем выражение для конечной температуры:

$$t_{\text{к}} = \frac{C_{\text{н}} \gamma_{\text{н}} (h_0 t_0 + h_{\text{п}} t_{\text{п}}) + C_{\text{в}} \gamma_{\text{в}} t_{0\text{в}} q \tau_0}{C_{\text{н}} \gamma_{\text{н}} (h_{\text{п}} - h_0) + C_{\text{в}} \gamma_{\text{в}} q \tau_0}. \quad (13)$$

Для сравнения с опытными данными были произведены расчеты по формуле (13) при следующих значениях физических констант, относящихся к бензину.

$$C_{\text{н}} = 0,56 \text{ ккал/кг } ^\circ\text{C};$$

$$\gamma_{\text{н}} = 0,75 \text{ кг/л};$$

$$C_{\text{в}} = 1 \text{ ккал/кг } ^\circ\text{C};$$

$$\gamma_{\text{в}} = 1 \text{ кг/л}.$$

Для учета того факта, что между прогретым и холодным слоями нефтепродукта лежит переходный слой, в котором температура падает от $t_{\text{п}}$ до t_0 , толщина прогретого слоя была увеличена при расчете примерно на половину толщины переходного слоя. В опытах с $h_{\text{п}} = 0,3 \text{ м}$ толщина переходного слоя составляла около $0,05 \text{ м}$.

Температура распыленной воды в опытах не превышала $18-20^\circ\text{C}$. Но поскольку капли воды проходят через горячие пары бензина прежде, чем попасть в жидкость, то температура их,

естественно, повышается. Фиксировать это повышение температуры не представлялось возможным. Расчеты показывают, что если взять температуру воды равной примерно 30° , то значение конечной температуры t_k , вычисленное по формуле (13), удовлетворительно соответствует опытным данным. Вычисленные значения конечной температуры приведены в табл. 2, где расчетная конечная температура обозначена $t_{k.p.}$

Уравнение теплового баланса (9) является термодинамическим соотношением, которое зависит только от начального и конечного состояний рассматриваемой системы и не отражает скорости протекания процесса. Поэтому выражение для конечной температуры, в которое входит величина t_0 , является неопределенным, поскольку величина t_0 зависит от скорости протекания процесса, которая должна быть установлена на основе дополнительных данных, не связанных с термодинамическими соотношениями.

Время охлаждения связано со скоростью перераспределения температуры в толще жидкости. Скорость изменения температуры в свою очередь зависит от скорости продвижения капель распыленной воды, которая является функцией интенсивности подачи воды и физических свойств жидкости (вязкости, плотности). Так как вязкость и плотность прогретого и холодного слоев различна, то, очевидно, скорость продвижения капель воды в этих слоях будет различна. В связи с этим суммарная скорость капель воды, отнесенная ко всему слою жидкости, определяется интенсивностью подачи воды и соотношением величин h_{II} и h_0 . Следовательно, и время охлаждения будет зависеть от этих величин.

На рис. 6 показана зависимость времени охлаждения от интенсивности подачи воды. Оказывается, что эта зависимость удовлетворительно описывается формулой:

$$\tau_0 = \frac{ah_{II} + bh_0}{q^n}, \quad (14)$$

где $a = 6,05 \text{ (сек/м)}^{1-n}$;
 $b = 0,714 \text{ (сек/м)}^{1-n}$;
 $n = 0,62$.

Величины a , b , n зависят только от свойств горючей жидкости и для данной жидкости постоянны.

Кривая на рис. 6 проведена в соответствии с расчетом по формуле (14).

Поскольку постоянные a , b , n определены для бензина, то формулы (13) и (14) полностью описывают процесс охлаждения прогретого слоя бензина.

В опытах, приведенных в табл. 2, время охлаждения фиксировалось как время, в течение которого температура жидкости становилась одинаковой по всему слою жидкости, находящейся в резервуаре. При использовании распыленной воды для охлаждения

прогретого слоя на практике нет нужды в том, чтобы распыленная вода подавалась до тех пор, пока температура станет одинаковой по всей глубине нефтепродукта, так как время охлаждения в этом случае может оказаться весьма большим. Время охлаждения должно определяться из того условия, чтобы температура жидкости вблизи поверхности была ниже некоторой наперед заданной температуры, которая соответствует наиболее благоприятным условиям для воздушно-механической пены.

Выше было показано, что при определенной температуре горючей жидкости вблизи поверхности воздушно-механическая пена, нанесенная на эту поверхность, теряет свою сопротивляе-

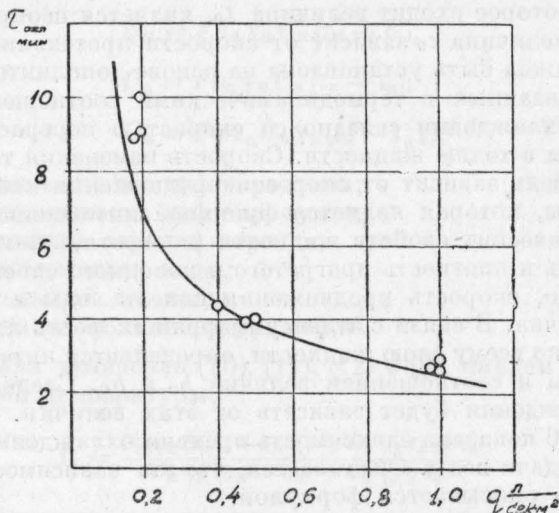


Рис. 6. Зависимость времени охлаждения прогретого слоя бензина от интенсивности подачи распыленной воды.

мость прорыву паров горючего. Для бензина эта температура приблизительно равна 70° . Следовательно, распыленная вода должна охладить прогретый слой бензина до температуры ниже 70° .

Численные значения температур t_0 , $t_{\text{п}}$, $t_{0\text{в}}$ могут быть заданы заранее, исходя, например, из наиболее жестких условий пожара. Интенсивность подачи воды определяется в основном конструктивными соображениями, связанными с требованиями максимального радиуса действия одного распылителя и максимальной степени плотности факела распыленной воды. Толщина прогретого слоя задается временем свободного горения, так как известно, что

$$h_{\text{п}} = v \tau_{\text{г}}, \quad (15)$$

где v — средняя скорость прогрева нефтепродукта;
 $\tau_{\text{г}}$ — время свободного горения.

Имея все вышеуказанные значения величин, входящих в формулы (13) и (14), можно рассчитать время охлаждения, если построить зависимости $t_k = f(z)$ и $t_0 = \varphi(z)$, где $z = h_{\text{п}} + h_0$.

Величина z представляет собой толщину слоя нефтепродукта, охваченного конвективными движениями. Следует указать, что величина z в общем не совпадает с толщиной всего слоя нефтепродукта, находящегося в резервуаре, так как для охлаждения прогретого слоя заданной толщины до определенной конечной температуры необходимо, чтобы конвективные токи проникли на глубину, определяемую уравнениями (13) и (14).

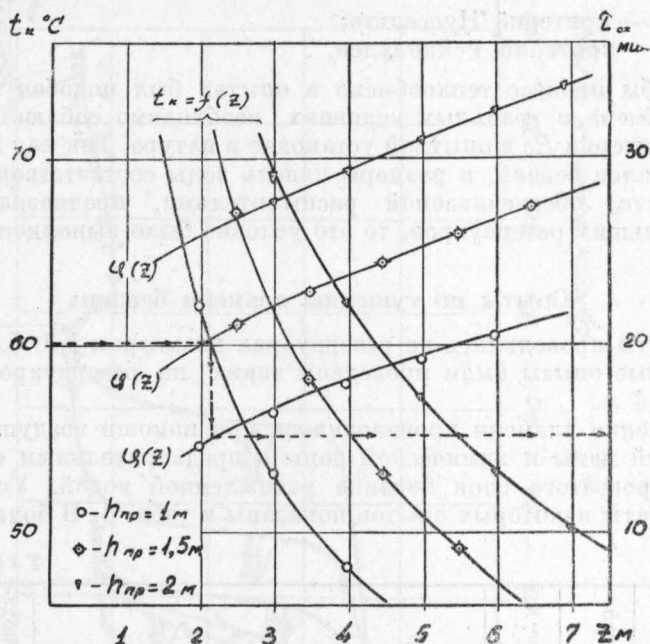


Рис. . Номограмма для расчета времени охлаждения.

На рис. 7 зависимости $t_k = f(z)$ и $t_0 = \varphi(z)$ построены для бензина при значениях толщины прогретого слоя 1; 1,5 и 2 м, что соответствует значениям времени свободного горения приблизительно 1; 1,5 и 2 часа. Интенсивность подачи распыленной воды взята равной $0,4 \text{ л/м}^2 \text{ сек}$.

Пунктирной линией показано, как следует определять время охлаждения, если конечная температура задана. Так, например, для охлаждения прогретого слоя толщиной 1 м до температуры 60° требуется при $q = 0,4 \text{ л/сек м}^2$ подавать распыленную воду не менее 15 мин. Необходимо сказать несколько слов о применимости результатов, полученных опытным путем на резервуаре диаметром 1,3 м, к описанию процесса охлаждения прогретого слоя нефтепродукта в резервуарах большего размера.

Диаметр резервуара D не входит в перечень величин, определяющих явление, так как процесс продвижения капель распыленной воды в толще жидкости зависит лишь от соотношения величин h_n и h_0 , если распыленная вода подается на поверхность нефтепродукта достаточно равномерно. Процесс перераспределения температуры жидкости при охлаждении зависит в конечном итоге от интенсивности теплообмена между каплями воды и средой, который выражается обычно критериальным уравнением

$$Nu = f(Re), \quad (16)$$

где Nu — критерий Нуссельта;
 Re — критерий Рейнольдса.

Чтобы процесс теплообмена в опытах был подобен процессу теплообмена в реальных условиях, необходимо соблюсти равенство критерия Re в опытной установке и натуре. Так как в опытах применялся бензин, и размеры капель воды соответствовали дисперсности, обеспечиваемой распылителями, предназначенными для больших резервуаров, то это условие было выполнено.

Опыты по тушению пламени бензина

Опыты проводились на резервуарах диаметром 1,3; 5,3; 8,6 м, некоторые опыты были проведены также на резервуаре диаметром 22,4 м.

Тушение пламени производилось при помощи воздушно-механической пены и химической пены с предварительным охлаждением прогретого слоя бензина распыленной водой. Условия и результаты некоторых опытов показаны в табл. 3. В большинстве

Таблица 3

№ опытов	Диаметр резервуара, м	Высота свободного борта, м	Толщина прогретого слоя, м	Средства тушения	Интенсивность подачи пены, л/сек · м ²	Время тушения, мин.
1	1,3	0,4	0,4	Пена ПО-1	0,32	23,2
2	1,3	0,4	0,4	Распыленная вода — пена ПО-1	0,32	9,9
3	1,3	0,5	0,4	То же	0,5	1,2
4	1,3	0,5	0,4	Пена ПО-1	0,5	—
5	1,3	0,7	0,4	Распыленная вода — пена ПО-1	0,5	1,8
6	1,3	0,7	0,3	Распыленная вода — хим. пена	0,4	1,7
7	5,3	0,7	0,03	Распыленная вода — пена ПО-1	1,1	4,0
8	5,3	0,7	0,03	Пена ПО-1	1,1	4,8
9	8,6	0,64	0,15	Распыленная вода — пена ПО-6	3,0	12,4
10	22,4	1,6	—	Распыленная вода — пена ПО-1	1,5	5,0

опытов производилось измерение температуры бензина при помощи термопар с записью на ленту потенциометра ЭПП-09. Термопары располагались по слою бензина на определенном расстоянии от свободной поверхности.

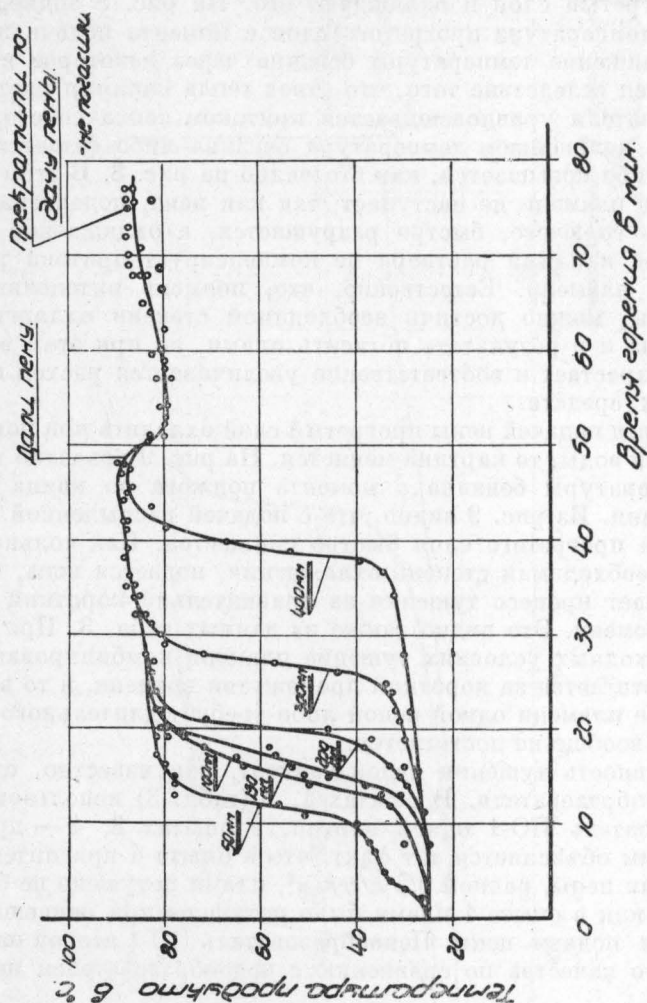


Рис. 8. Распределение температуры в слое бензина при тушении пламени воздушно-механической пеной.

На рис. 8 показано изменение температуры в слое бензина во время свободного горения и тушения пламени при помощи воздушно-механической пены ПО-1 без предварительного охлаждения прогретого слоя распыленной водой. Цифры у кривых показывают расстояние данной термопары от свободной поверхности.

Рис. 8 показывает типичные изменения температуры прогретого слоя нефтепродукта при тушении пламени с помощью пены. При подаче пены на поверхность бензина, температура которого довольно высока (90° на рис. 8), происходит интенсивное разрушение пены, капли раствора пенообразователя (отсек) проходят сквозь прогретый слой и охлаждают его. На рис. 8 видно, как снижается температура прогретого слоя с момента подачи пены. Однако понижение температуры бензина через некоторое время прекращается вследствие того, что отвод тепла каплями раствора пенообразователя уравнивается притоком тепла со стороны пламени. В дальнейшем температура бензина либо остается постоянной, либо повышается, как это видно на рис. 8. В этом случае тушение пламени не наступает, так как пена, подаваемая на поверхность горючего, быстро разрушается, а охлаждение прогретого слоя каплями раствора не компенсирует притока тепла со стороны пламени. Естественно, что, повысив интенсивность подачи пены, можно достичь необходимой степени охлаждения слоя бензина и в результате погасить пламя, но при этом время тушения возрастает и соответственно увеличивается расход пенообразующих средств.

Если перед подачей пены прогретый слой охладить при помощи распыленной воды, то картина меняется. На рис. 9 показано изменение температуры бензина с момента поджога до конца процесса тушения. Из рис. 9 видно, что с подачей распыленной воды температура прогретого слоя быстро снижается. Как только достигается необходимая степень охлаждения, подается пена, которая завершает процесс тушения за сравнительно короткий промежуток времени. Это видно также из данных табл. 3. При одинаковых исходных условиях тушение пламени комбинированным методом достигается за короткий промежуток времени, в то время как тушение пламени одной пеной либо требует длительного времени, либо вообще не достигается.

Эффективность тушения пеной зависит, как известно, от качества пенообразователя. В опытах 1, 2 (табл. 3) использовался пенообразователь ПО-1 одной партии, в опытах 3, 4 — другой партии. Этим объясняется тот факт, что в опыте 4 при интенсивности подачи пены, равной $0,5 \text{ л/сек м}^2$, пламя потушено не было, в то время как в опыте 1 пламя было потушено при меньшей интенсивности подачи пены. Пенообразователь ПО-1 второй партии был низкого качества по сравнению с пенообразователем первой партии.

В опытах табл. 3 пена подавалась в резервуар через обычные пеносливные устройства. Были сделаны попытки применить для тушения пламени комбинированным методом распыленную воздушно-механическую пену, получаемую из винтового распылителя. Опыты дали положительный результат при тушении пламени в резервуарах диаметром не более 5,3 м. Применение распыленной пены в резервуарах больших размеров (диаметром 8,6 и 22,4 м) показало низкую эффективность этого способа подачи пены.

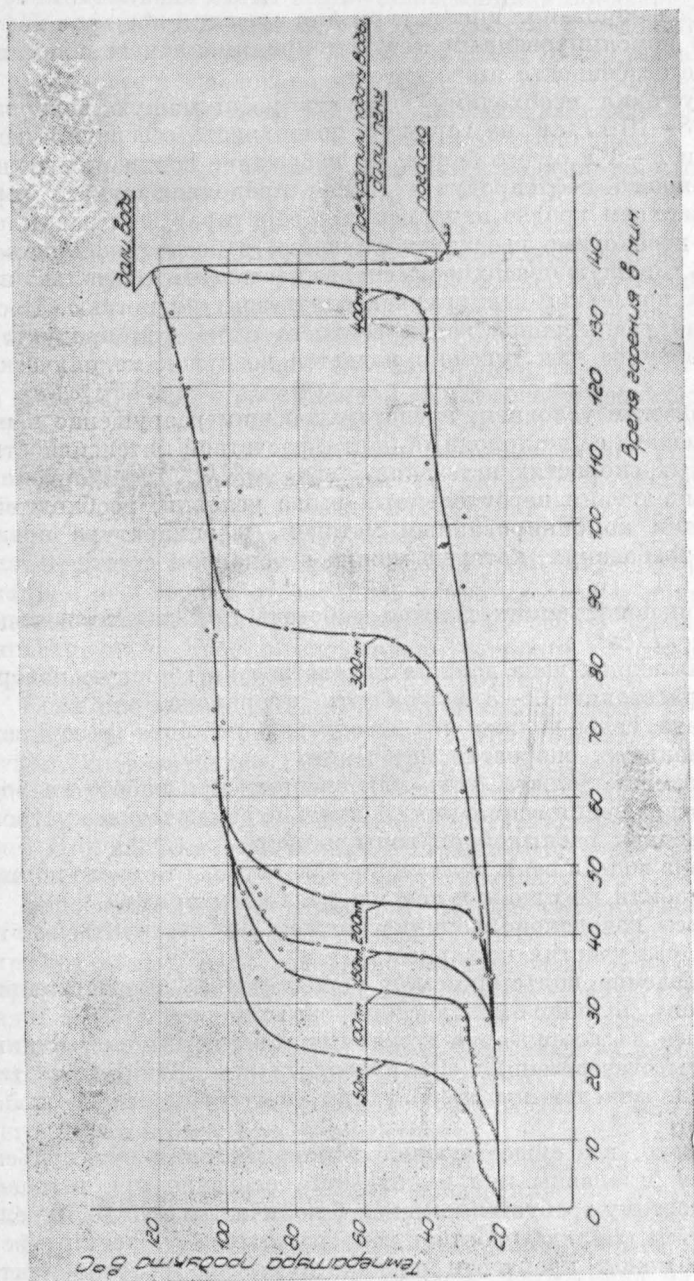


Рис. 9. Распределение температуры в слое бензина при тушении пламени воздушно-механической пеной с пред-
варительным охлаждением слоя бензина распыленной водой.

Аппаратура

При проектировании аппаратуры для тушения пожаров нефтепродуктов комбинированным методом принимались во внимание следующие особенности этого метода.

Для тушения необходимо подавать распыленную воду при давлении $8-10 \text{ кг/см}^2$ на горящую поверхность резервуара и на расстоянии $2-3 \text{ м}$ от его борта. Во избежание вскипания и выброса горящего нефтепродукта (после продолжительного горения при верхнем уровне наполнения резервуара) зонт распыленной воды необходимо вводить постепенно, в несколько приемов, покрывать горящую поверхность сперва частью зонта и только при отсутствии признаков вскипания вводить зонт полностью. После охлаждения распыленной водой верхнего слоя нефтепродукта и борта резервуара для тушения подается воздушно-механическая пена.

Необходимым условием, предотвращающим разрушение пены, является подача ее на холодный борт с расчетной интенсивностью и при малых скоростях истечения.

Для выполнения перечисленных выше условий, необходимых при тушении комбинированным методом, к аппаратуре предъявляются требования, которые можно в основном свести к следующим.

1. Водопеноподъемник должен работать при давлении воды, равном 10 кг/см^2 .

2. Распыленная вода должна подаваться на горящую поверхность на расстоянии $2-3 \text{ м}$ от борта резервуара.

3. Подача пены должна производиться на борт резервуара при минимальных скоростях истечения.

4. Подъемник должен быть маневренным при работе на воде (для предотвращения вскипания) и иметь переключающее устройство для подачи распыленной воды и пены.

5. Подача воды и пены должна производиться от одного пожарного автомобиля по одним и тем же рукавным линиям.

6. Подъем водопеноподъемника должен осуществляться автоматически, без участия пожарных.

7. Управление подъемником и переключение с распыленной воды на пену должно быть дистанционным.

Принятые на вооружение пожарных команд пеноподъемники и пеноматчи отечественных и зарубежных конструкций не отвечают вышеперечисленным требованиям, в особенности по пп. 1, 2, 4, 7.

Кроме того, все существующие пеноподъемники при подъеме вручную не безопасны при их падении, особенно при ветреной погоде, и поэтому требуется команда в количестве от 5 до 10 человек. При этом команда работает непосредственно у стенки резервуара, где может произойти перелив горящего нефтепродукта.

Исходя из вышеизложенных требований, ЦНИИПО спроектировал и построил водопеноподъемник для тушения пожаров

нефтепродуктов в резервуарах диаметром до 8 м включительно. Принципиальная схема водопеноподъемника показана на рис. 10.

Пожарный автомобиль устанавливается у водоисточника. От автомобиля прокладываются две рукавных линии, подающих воду в противовес и в водопенопроводную трубу подъемника. По мере заполнения противовеса водой подъемник начинает подниматься. Подъемник удерживается в несколько приподнятом положении за трос до тех пор, пока не покажется вода из переливного кармана противовеса.

По мере отдачи троса подъемник поднимается и устанавливается в оттянутом положении. Затем подается вода во вторую линию, соединяющую насос с распылителем подъемника.

Ввод и вывод распыленной воды на горящую поверхность резервуара совершается отдачей и оттягиванием подъемника за трос. Подъемом и вводом управляет один человек.

Переключение с распыленной воды на пену производится водителем автомобиля, работающим у насосного отделения. Для подачи пены необходимо открыть соответствующие краны пенной коммуникации, затем убавить газ автомобиля до наименьших оборотов вала мотора и после 2-секундной выдержки снова дать газ до установленного давления.

Опускание подъемника производит один человек. Перед опусканием необходимо отсоединить у противовеса и у трубы подъемника рукава. Укладку подъемника на землю производят подтягиванием за трос и удерживают в таком положении до тех пор, пока не сольется вся вода из противовеса.

Если противовес заполнить водой неполностью, то подъемник поднимется на определенный угол и уравновесится в этом положении, следовательно, $G_1 l_1 = G_2 l_2$.

Изменяя вес противовеса G , соответственно изменяются плечи l_1 и l_2 и при новом угле подъема наступает равновесное положение. Это свойство подъемника характеризует его устойчивость при подъеме и обеспечивает полную безопасность в работе.

Водопеноподъемник стальной сварной конструкции состоит из трех звеньев; первое звено для удобства упаковки и транспортировки может быть разобрано на три части — на противовес, ферму и опору. На нефтебазах первое звено хранится в собранном виде; вес его около 85 кг. Второе звено, состоящее из трубы и уголков, весит 12 кг. Третье звено, состоящее из переключателя, пенного ствола и консольной трубы, весит 30 кг. Звенья между собой соединяются посредством наворачивания гайки последующего звена на штуцер предыдущего.

Для сборки подъемника требуются 3 человека. Вначале переносится первое звено, к нему присоединяется второе и затем третье.

Подъемник в собранном виде при необходимости может быть перенесен на новое место. Установка подъемника на резервуар производится, как было описано выше, заполнением противовеса водой.

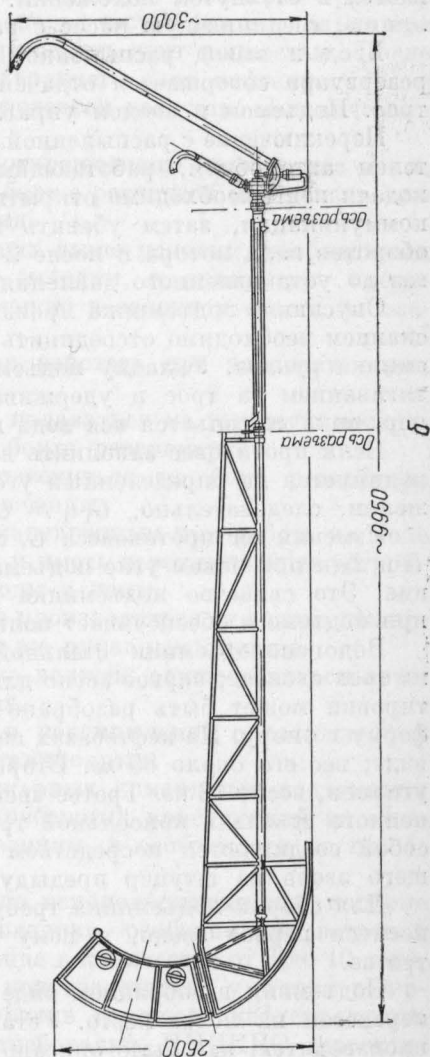
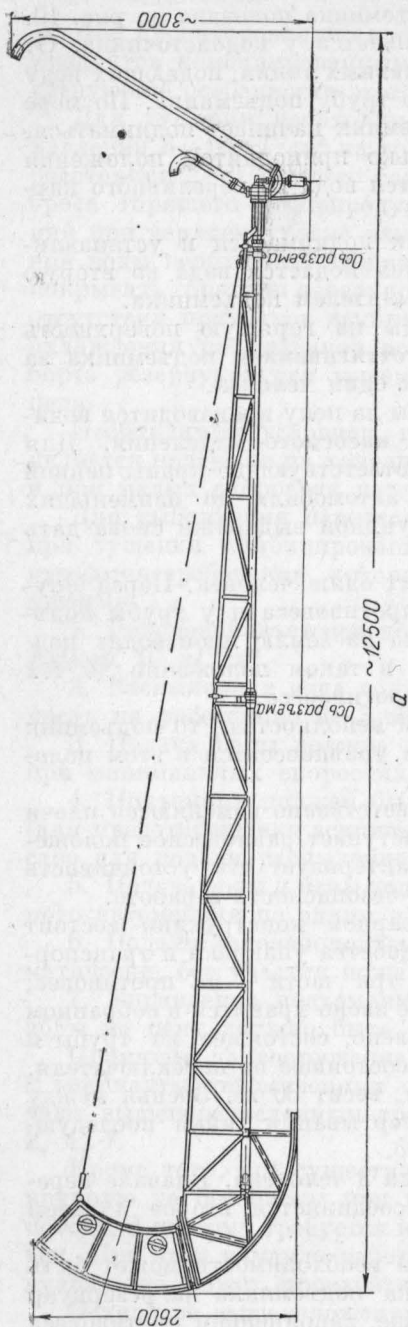


Рис. 10. Принци-
пальная схема водо-
пенноподъемника.
а — в собранном виде;
б — без верхнего звена.

Гидравлический переключатель (рис. 11), состоящий из цилиндрического пробкового крана 1, силового цилиндра 3 и рычага с трещеткой 2, вмонтирован между пенным стволом и коленом третьего звена. В пробке крана имеются три окна, расположенные через 120° на цилиндрической стенке, и одно отверстие на дне пробки, через которое вода или раствор поступает в пробку. В корпусе крана имеются одно нижнее входное и два выходных отверстия, к которым присоединяются пенный ствол и колено третьего звена подъемника. При совпадении одного из окон пробки с окном корпуса второе окно корпуса закрывается стенкой пробки, и

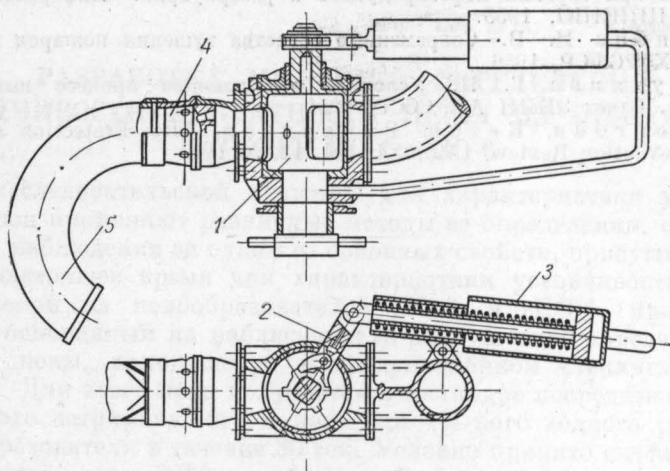


Рис. 11. Схема гидравлического переключателя.

1 — пробковый кран; 2 — рычаг с трещеткой; 3 — силовой цилиндр; 4 — пенный ствол; 5 — пенослив.

жидкость имеет выход только в одно открытое окно. При поднятии давления в водопенной трубе подъемника поршень силового цилиндра, обжимая пружину, выдвигает шток, который поворачивает рычаг и пробку крана на 60° , при этом открытое окно крана закрывается, а противоположное ему окно в корпусе крана открывается.

При падении давления поршень силового цилиндра вместе с рычагом под воздействием силы пружины возвращается в исходное положение, при этом пробка остается на месте, а собачка трещетки заскакивает на следующий зуб храповика, сидящего на квадрате хвостовика пробки. Таким образом, при каждом ходе поршня силового цилиндра поочередно открываются отверстия в корпусе крана, и жидкость подается то в пенный ствол, то в распылитель.

На стенках пробки с противоположной стороны окон имеются отверстия диаметром 7 мм, служащие для протекания жидкости, идущей на охлаждение выключенного ствола или распылителя.

Засверловки для охлаждения также имеются в штоке поршня, рычаге и хвостовике пробки. Подъемник прошел испытания на стандартном резервуаре емкостью 400 м³ при тушении автомобильного бензина после его горения в течение 1 часа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блинов В. И., Худяков Г. Н. О механизме тушения пламени жидкостей в резервуарах с помощью пены. Информационный сборник ЦНИИПО, 1958.
2. Лосев В. П., Казаков М. В. О механизме тушащего действия пен при горении нефтепродуктов в резервуарах. Информационный сборник ЦНИИПО, 1958.
3. Рябов И. В. Современные средства тушения пожаров пенами. Изд. МХ РСФСР, 1956.
4. Худяков Г. Н. Условия, нарушающие процесс выгорания жидкости. Отчет ЭНИН АН СССР, 1951.
5. Боргойн, Кетон, Ричардсон. Fire Protection and Accident Prevention Review, 1949, XI, vol. 12, № 109.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ И КРАТНОСТИ ПЕНЫ ИЗ ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПО-1 и ПО-6

В исследовательской практике для характеристики устойчивости пен применяют различные методы ее определения, основанные на наблюдении за одним из основных свойств, присущих пене.

В настоящее время для характеристики устойчивости пены, получаемой из пенообразователей ПО-6 и ПО-1, применяют метод, основанный на наблюдении за разрушением определенного объема пены, находящейся в градуированном стеклянном цилиндре. Для этого пена получается в цилиндре посредством механического встряхивания 2%-ного или 4%-ного водного раствора пенообразователя в течение 30 сек. Условно принято считать пену устойчивой, если 20% ее общего объема разрушится не менее чем за 30 или 60 мин. Это время зависит от свойств и типа пенообразователя. Такой метод определения устойчивости включен в действующий в настоящее время ГОСТ 6948-54 на пенообразователь ПО-1 и ТУ 193-56 на пенообразователь ПО-6.

Нами были проведены сравнительные определения кратности и устойчивости нескольких образцов растворов пенообразователей ПО-1 и ПО-6. Определения проводились в одинаковых условиях согласно методике ГОСТ 6948-54 и ТУ 193-56, но выполняли их параллельно два исследователя. Результаты этих опытов представлены в табл. 1 и 2, из которых видно, что качество получаемой пены существенно зависит от силы встряхивания цилиндра с раствором пенообразователя.

Полученные по этому методу результаты имеют плохую воспроизводимость и не дают достаточно надежных показателей, характеризующих качество пены. Кроме этого, при встряхивании цилиндра вручную неизбежно происходит субъективная ошибка, зависящая от навыка и усилия экспериментатора, получающего пену. Так же известно, что пена обладает огнетушащей способностью лишь в стадии концентрированной эмульсии. Такое состояние пены, как показывают наблюдения, соответствует приблизительно 6—9 мин. с момента ее получения. Вре-

Таблица 1

Пенообразова- тель ПО-1	Определение 1		Определение 2	
	крат- ность	устойчивость по ГОСТ 6948-54	крат- ность	устойчивость по ГОСТ 6948-54
Опыт № 1 . . .	10	Соответствует требованиям	10,7	Соответствует требованиям
» № 2 . . .	7	То же	10	Не соответству- ет требованиям
» № 3 . . .	10	»	11	То же
» № 4 . . .	11,5	»	12	Соответствует требованиям

Таблица 2

Пенообразова- тель ПО-6	Определение 1		Определение 2	
	крат- ность	устойчивость по ТУ 193-56	крат- ность	устойчивость по ТУ 193-56
Опыт № 1 . . .	8,7	Соответствует требованиям	8,5	Не соответству- ет требованиям
» № 2 . . .	5,5	То же	5,7	Соответствует требованиям
» № 3 . . .	5,8	Не соответст- вует требованиям	5,9	Не соответству- ет требованиям

же, характеризующее устойчивость пены, принятое по стандартной методике, соответствует 30—60 мин. Таким образом, оценка качества пены, получаемой путем встряхивания цилиндра вручную, по разрушению 20% ее столба также не является показательной.

В процессе разрушения пена претерпевает изменения. С одной стороны, изменяется ее дисперсность и уменьшается количество пузырьков, составляющих пену, а с другой, — утоньшается толщина пленок пузырьков. В результате из пены выделяется жидкая дисперсионная среда (отсек), т. е. происходит явление синерезиса. Таким образом, скорость синерезиса является характеристикой устойчивости пены и в известной мере характеристикой огнетушащей способности.

Исследования процесса выделения жидкой дисперсионной среды из пены проводились многими авторами, из которых следует упомянуть работы К. Н. Арбузова и Б. Н. Гребенщикова [1], С. Росса и М. Кутилласа [2], Р. Френча и П. Хинкли [3], Г. П. Митькевича [4] и Б. Д. Путенихина [5]. Своими экспериментами они показывают, что скорость синерезиса можно рассматривать как качественную и количественную величину, характеризующую устойчивость и огнетушащую способность пены.

Для характеристики скорости синерезиса огнетушащих пен нами принята величина, соответствующая времени выделения из

пены 50% жидкой дисперсионной среды. Как показывают лабораторные исследования, этот показатель является достаточно характерным для оценки огнетушащего действия пены [6].

При определении показателей кратности и устойчивости пены значения величин, характеризующих эти свойства, обычно принимаются условно и зависят от метода получения пены. Это достаточно отчетливо было показано на примере получения пены встря-

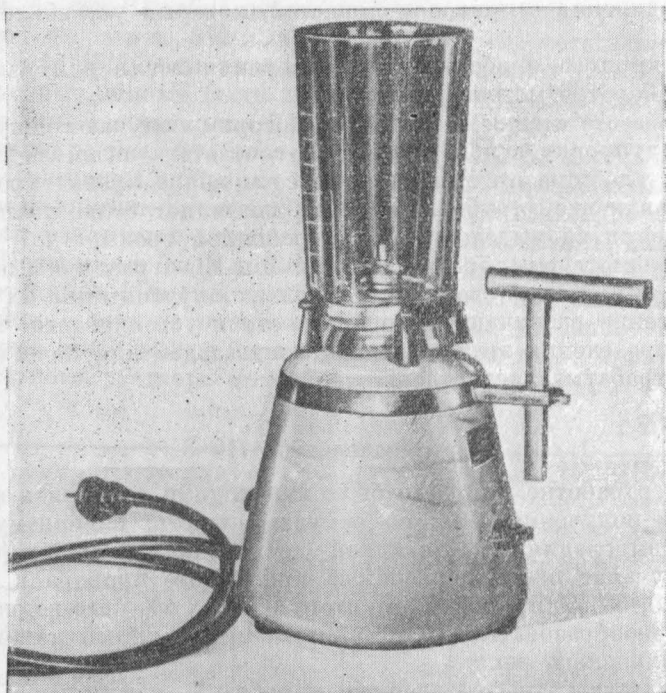


Рис. 1. Прибор для получения пены с дополнительным приспособлением, позволяющим более точно замерить объем выделяющейся дисперсионной среды.

хиванием пенообразующего раствора вручную в стеклянном градуированном цилиндре. Поэтому чрезвычайно важным условием для получения надежных, легко воспроизводимых результатов является выбор метода получения пены. С этой целью были рассмотрены используемые в лабораторных условиях методы получения пены и проанализированы принципы их работы [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

В результате наиболее удовлетворяющим нашим требованиям оказался прибор, работающий на принципе механического перемешивания и носящий название размельчителя тканей (рис. 1). Этот прибор выпускается Киевским заводом медицинского обо-

рудования и предназначен для получения суспензий, эмульсий, растворов, а также и пен [11].

Получение пены в приборе осуществляется при помощи подвижных лопастей (ножей), скорость вращения которых составляет 4000 и 8000 об/мин.

Прибор состоит из двух основных частей: корпуса и толсто-стенного стакана. В корпус вмонтирован электродвигатель, имеющий на валу муфту с квадратным наконечником, предназначенным для соединения с приводом лопастей, который установлен в дне стакана.

На корпусе прибора имеется переключатель для изменения числа оборотов мотора.

По высоте стенки стакана, в котором получают пену, нанесены градуировку с ценой делений, соответствующей 50 см³.

Для удобства отсчета на корпусе прибора крепят кронштейн с направляющей трубкой, которая позволяет более точно вести наблюдения за выделением дисперсионной среды.

Поскольку пенообразователи ПО-6 и ПО-1 различны по своим физико-химическим свойствам, и пены, полученные на их основе, существенно различаются по кратности и устойчивости, то методика определения этих основных показателей для каждого типа пены обрабатывалась отдельно.

Пенообразователь ПО-6

При обработке методики было необходимо проверить влияние времени получения пены на ее устойчивость, измеряемую временем выделения 50% жидкой дисперсионной среды (отсека).

Получение пены проводилось при работе прибора в течение 5, 10, 20, 30, 40 и 50 сек. Для этого 100 см³ 4%-ного водного раствора пенообразователя ПО-6 заливали в стеклянный стакан, после чего получалась пена.

Результаты, представленные в табл. 3, показывают зависимость кратности и устойчивости пены от времени ее получения.

Таблица 3

Показатели качества пены	Время получения пены, сек.					
	5	10	20	30	40	50
Кратность . . .	4	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1
Устойчивость . .	5'	5'30"	13'40"	15'30"	17'	17'20"

Исходя из приведенных данных, для дальнейших определений время проведения опыта было принято 30 сек.

Для выяснения влияния концентрации на воспроизводимость результатов измерения кратности и устойчивости получаемой

пены были исследованы растворы ПО-6 в воде с концентрацией пенообразователя 2, 3, 4 и 6%.

Опыты показали, что наиболее приемлемые результаты дают растворы с концентрацией 3, 4 и 6%.

У 2%-ного раствора ПО-6 наблюдается довольно сильное расхождение цифровых данных. Так, например, наименьшее значение, характеризующее время выделения 50% жидкой дисперсионной среды, соответствует 10 мин., а наибольшее — 12 мин. 45 сек. Ошибка опыта составляет 20,7%.

Если же взять 6%-ный раствор, то соответственно имеем 17'10" и 17'45". Ошибка опыта здесь составляет уже 2%.

Подобные данные были получены для 4%-ного раствора, где ошибка опыта составляла 3,3%.

В связи с тем, что пенообразователь ПО-6, а тем более его водные растворы обладают пониженной биостойкостью, было проверено влияние времени хранения водных растворов пенообразователя различных концентраций на устойчивость получаемой пены. Испытанию были подвергнуты растворы в 2, 3, 4 и 6%-ной концентрациях. Опыты показали, что хранение этих растворов в течение 7 час. не оказывает влияния на устойчивость пены. Примером этого могут быть приведенные в табл. 4 результаты для 4%-ного раствора пенообразователя.

Таблица 4

Время определения с момента приготовления раствора, час.	1	2	3	4	5	6	7
Время, характеризующее выделение 50% дисперсионной среды	15'58"	15'50"	15'40"	15'04"	15'45"	15'32"	15'55"

Для сравнения показателей устойчивости пены, полученных по предлагаемой методике, параллельно были проведены определения этих же свойств согласно методике ТУ 193-56.

В сравнительных опытах были проведены пенообразующие свойства нескольких образцов пенообразователя ПО-6 разных лет выпуска, а именно:

а) пенообразователь ПО-6 выпуска 1956 г., изготовленный Московским мясокомбинатом;

б) пенообразователь ПО-6, изготовленный в 1957 г. Московским мясокомбинатом (с признаками разложения);

в) пенообразователь ПО-6, изготовленный в ЦНИИПО в 1950 г.;

г) пенообразователь ПО-6 выпуска 1958 г., изготовленный Московским мясокомбинатом.

Результаты опытов приведены в табл. 5.

Таблица 5

Наименование пенообразователя	Новая методика оценки качества пены из 4%-ного раствора ПО-6		Методика оценки каче- ства пены из 4%-ного рас- твора ПО-6 по ТУ 193-56	
	крат- ность	устойчи- вость	крат- ность	устойчивость
Пенообразователь ПО-6 выпуска 1956 г.	4,1	15'35"	6	Соответствует требованиям ТУ
Пенообразователь, ПО-6 выпуска 1957 г.	4,1	13'06"	5,5	То же
Пенообразователь, изготов- ленный в лаборатории (1950 г.)	4,1	9'25"	5,5	Не соответст- вует требованиям ТУ
Пенообразователь ПО-6 выпуска 1958 г.	4,0	15'38"	6	Соответствует требованиям ТУ

Из табл. 6 видно, что новая методика оценки качества пены, получаемой из пенообразователя ПО-6, совпадает со старой и наряду с получением хорошо воспроизводимых результатов позволяет более точно в количественном отношении характеризовать устойчивость пены.

Таким образом, показателями качества пены, приготовленной из 4%-ного водного раствора ПО-6, получаемой при помощи размельчителя тканей, являются кратность не менее 4 и устойчивость по времени выделения 50% жидкой дисперсионной среды не менее 15 мин. 30 сек.

Пенообразователь ПО-1

Для пенообразователя ПО-1 было также проверено влияние времени получения пены в приборе на ее устойчивость. Определения проводились при работе прибора 5, 10, 20, 30, 40 и 50 сек. Полученные усредненные данные приведены в табл. 6.

Таблица 6

Показатели качества пены	Время получения, сек.					
	5	10	20	30	40	50
Кратность	6,0	6,1	6,1	6,1	6,1	6,1
Устойчивость . .	5'45"	7'05"	7'25"	7'37"	7'40"	7'40"

Исходя из полученных данных, для дальнейших определений так же, как и для ПО-6, наиболее удовлетворяющим является время работы прибора, равное 30 сек.

При проведении работы были испытаны растворы пенообразователя ПО-1 различной процентной концентрации 0,5; 1; 2; 4; 6; 8; 20 и 40%. При этих концентрациях растворов были получены достаточно стабильные результаты. Так, например, для 4%-ного раствора наименьшее значение в определении устойчивости соответствует 6'56'', а наибольшее 7'04''. Ошибка опыта в данном случае составляет около 2%.

Из рассмотрения результатов устойчивости пен, полученных при указанных выше концентрациях водных растворов пенообразователя (табл. 7), следует, что наибольшей устойчивостью обладает пена, полученная из 2%-ного раствора пенообразователя. Это, очевидно, объясняется тем, что пленки пузырьков пены, полученной из этого раствора, обладают оптимальным насыщением адсорбционного слоя.

Таблица 7

Концентрация водных растворов пенообразователя, %	0,5	1	2	4	6	8	20	40
Устойчивость пены	2'22"	6'45"	7'56"	7'	7'05"	6'42"	6'15"	5'35"

В связи с тем, что в предыдущих работах [12] было приведено влияние времени хранения водных растворов подобных пенообразователей на качество получаемой пены, нами была проверена устойчивость пены различных концентраций пенообразователя в зависимости от продолжительности его хранения.

Полученные данные для 2%-ного раствора ПО-1 представлены в табл. 8.

Таблица 8

Время определения с момента получения раствора, час.	0	1	2	3	5	7	8
Время выделения 50%-ной дисперсионной среды	7'52"	7'45"	7'40"	7'35"	7'10"	7'20"	7'20"

Полученные данные указывают на то, что время хранения приготовленного раствора пенообразователя влияет на качество получаемой пены и что необходимо проводить определения лишь со свежеприготовленными растворами пенообразователя.

Для сравнения данных устойчивости пены, получаемых по новой методике, параллельно были проведены определения ее по методике, принятой ГОСТ 6948-54.

В контрольных опытах были проверены следующие пенообразователи ¹:

- а) пенообразователь ПО-1, изготовленный в соответствии с ГОСТ 6948-54;
 - б) пенообразователь ПО-1 без спирта;
 - в) пенообразователь ПО-1 с 3% клея;
 - г) пенообразователь ПО-1 с 4% клея;
 - д) пенообразователь ПО-1, изготовленный в соответствии с ГОСТ 6948-54, паспорт № 40691;
 - е) пенообразователь ПО-1, находящийся в Баку.
- Полученные данные приведены в табл. 9.

Таблица 9

Наименование пенообразователя и год выпуска	Новая методика оценки качества 2%-ного рас- твора ПО-1		Методика оценки качества 2%-ного раствора ПО-1 по ГОСТ 6948-54	
	кратность	стойкость	кратность	стойкость
ПО-1, 1955 г. . . .	6	7'52"	11	Соответствует требованиям ГОСТ
ПО-1 без спирта, 1955 г.	6	8'10"	12	То же
ПО-1 с 3% клея . . .	6	8'27"	11	»
ПО-1 с 4% клея . . .	6	9'20"	11	»
ПО-1, паспорт № 40691	6	6'55"	11	Не соответствует требованиям ГОСТ (28')
ПО-1 находящийся в Баку	6	8'28"	12	Соответствует требованиям ГОСТ

Из табл. 9 видно, что новая методика оценки качества совпадает со старой и позволяет более точно в количественном отношении характеризовать устойчивость пены. Цифровые данные показывают также достаточно хорошую воспроизводимость результатов для каждого из образцов пенообразователя.

Таким образом, показателями качества пены, приготовленной из 2%-ного водного раствора ПО-1, получаемой при помощи размельчителя тканей, являются кратность не менее 6 и устойчивость по времени выделения 50%-ной жидкой дисперсионной среды не менее 8 мин. 20 сек.

Выводы

1. Установлено, что методика определения кратности и стойкости пены по ГОСТ 6948-54 и ТУ 193-56 не является показательной.

¹ По шп. «а», «б», «в» и «г» изготовлены в 1955 г.

2. Предложен прибор для получения воздушно-механической пены.

3. На основе предложенного прибора разработана новая лабораторная методика определения кратности и устойчивости пены, полученной из пенообразователей ПО-1 и ПО-6.

4. Данные, полученные по новой методике, позволяют более точно характеризовать устойчивость пены.

5. Установлено, что характеристиками качества пены, полученной из 2%-ного водного раствора ПО-1 по новой методике, являются следующие показатели: а) кратность не менее 6, б) устойчивость по времени выделения 50%-ной дисперсионной среды (отсека) не менее 8 мин.

6. Установлено, что характеристиками качества пены, полученной из 4%-ного водного раствора ПО-6 по новой методике, являются следующие показатели: а) кратность не менее 4, б) устойчивость по времени выделения 50%-ной дисперсионной среды (отсека) не менее 15 мин.

7. Разработанная ЦНИИПО методика может быть рекомендована для включения в ГОСТ на пенообразователь ПО-1 и в ТУ на пенообразователь ПО-6.

Приложение к статье В. П. Лосева и М. В. Казакова

Методика определения кратности и устойчивости пены

Определение кратности и устойчивости пены проводится на приборе, носящем название размельчитель тканей.

О п и с а н и е п р и б о р а

Прибор (см. рис. 1) состоит из двух основных частей — корпуса и стеклянного стакана.

В корпусе вмонтирован электродвигатель, имеющий на валу муфту с квадратным наконечником, установленным в дне стакана и предназначенным для соединения с приводом лопастей. На валу привода закреплены две лопасти.

На корпусе прибора имеется переключатель для изменения числа оборотов мотора. В нулевом положении переключателя прибор обесточен, при вращении ручки по часовой стрелке число оборотов возрастает.

Для определения кратности исследуемой пены на стеклянный стакан необходимо нанести градуировку с ценой делений, равной 50 см³. Чтобы иметь возможность более точно замерять количество выделившейся дисперсионной среды (отсека) из пены, к корпусу прибора при помощи кольца крепится на кронштейне металлическая трубка с внутренним диаметром 18 ± 2 мм. Трубка может перемещаться в вертикальном направлении и крепится стопорным винтом. В конце трубки, расположенном ближе к ста-

кану, на расстоянии 10 ± 2 мм припаяна тонкая металлическая пластинка со щелевым горизонтальным отверстием, размеры которого составляют 4×1 мм.

Методика определения

Свежеприготовленные 4%-ный для ПО-6 и 2%-ный для ПО-1 растворы пенообразователя в количестве 100 см^3 наливают в стеклянный стакан. Стакан устанавливают в гнездо на корпусе и поворотом переключателя в положение, соответствующее цифре 1 (4000 об/мин), приводят лопасти во вращательное движение. Одновременно включают секундомер. Раствор пенообразователя перемешивают в течение 30 сек. По истечении этого времени прибор останавливают и фиксируют объем полученной пены. Этот объем численно равен кратности пены. Наблюдение за количеством выделяющейся из пены жидкой дисперсионной среды (отсека) продолжают до накопления 50 см^3 по объему. При достижении выделяющейся жидкостью метки на стенке стакана, соответствующей 50 см^3 , выключают секундомер. Показатель устойчивости пены характеризуется временем выделения 50% объема раствора пенообразователя за вычетом 30 сек., затраченных на получение пены.

Определения кратности и устойчивости пены повторяют три раза и берут среднее значение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арбузов К. Н., Гребенщиков Б. Н. Ж. Ф. Х., 10, вып. 1, 1937.
2. Ross S., Cutillas M. J. J. Phys. Chem., 9, 59, 1955.
3. French K. J., Hinkley P. Z. J. of Applied Chem., 4, 9, 1954.
4. Митькевич Г. Н. Журн. Прикл. хим., 7, 21, 1948.
5. Путенихин Б. Д. Отчет ЦНИИПО МВД СССР, 1952.
6. Казаков М. В., Лосев В. П. Отчет ЦНИИПО МВД СССР, 1958.
7. By Ieseph Sincheimer. Soap., 26. № 8, 1950.
8. Мокрушин С. Г., Борисихина В. И. Журн. Прикл. хим., 28, вып. 1, 1955.
9. Brown A. G. и др. J. Colloid. Soc, 8, № 5, 1953.
10. Weeks L. E. и др. The J. of American Oil Chemists Society, VI, 31, № 6, 1954.
11. Описание и инструкция «Размельчитель тканей», Киев, 1957.
12. Петрова Н. Н. Физико-химия моющего действия, под ред. Ребиндера П. А. Пищепромиздат, 1935.

К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ И ИЗОЛИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВОЗДУШНО- МЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕНЫ

I

В настоящее время средства пенного тушения являются одними из основных способов борьбы с пожарами легковоспламеняющихся жидкостей.

В связи с этим вопросу исследования механизма огнетушащего действия пен уделяется большое внимание как у нас, так и за рубежом. На протяжении последних лет этот вопрос разрабатывал ряд исследователей, среди которых следует упомянуть И. В. Рябова [1], Б. Д. Путенихина [2], В. И. Блинова и Г. Н. Худякова [3], В. П. Лосева и М. В. Казакова [4] и др.

В настоящее время установлено, что основными факторами, влияющими на прекращение процесса горения легковоспламеняющихся жидкостей при тушении их пенами, являются охлаждение прогретого слоя нефтепродукта жидкостью, выделяющейся из пены при ее разрушении, и изоляция горючих паров слоем пены от факела (зоны) горения. При этом под изоляцией понимается как замедление скорости диффузии паров горючего через слой пены, так и сопротивление или устойчивость этого слоя к прорыву сквозь него паров.

В работах Б. Д. Путенихина [2] была исследована скорость выделения жидкости из пены (синерезис) при нанесении последней на различные горючие. Однако эти исследования проводились при комнатной температуре (17—20°) горючей жидкости и поэтому полного представления о действии выделяющейся дисперсионной среды из пены при тушении горящих жидкостей получено не было.

Изолирующая способность пен, на наш взгляд, еще также достаточно полно не обоснована. Для ее характеристики некоторые авторы пользовались различными способами.

Б. Д. Путенихин [2] исследовал изолирующую способность путем определения количества паров горючего, продиффундировавших через слой пены.

В. И. Блинов и Г. Н. Худяков [3] характеризовали изолирующую способность удельной скоростью испарения жидкости через слой пены определенной толщины.

В. П. Лосев и М. В. Казаков [4] определяли изолирующую способность временем тушения.

Основным недостатком первых двух методов является то, что определения проводились при температуре порядка 20°. Кроме того, полученные авторами данные не подтверждали возможность загорания паров.

Третий метод определения изолирующей способности также является малопоказательным, так как не дает четкого представления о влиянии различных факторов на процесс тушения.

Таким образом, изолирующее действие пен является еще далеко не выясненным вопросом.

Одной из причин этого является, по-видимому, то, что в предыдущих работах поведение пены рассматривалось как бы в отрыве от поведения горючей жидкости. Поэтому при исследовании изолирующей способности пены необходимо рассматривать ее действие с двух точек зрения:

- 1) с точки зрения устойчивости самой пены, т. е. как влияют различные факторы, как-то: структура горючей жидкости, качество пены, температура прогретого слоя горючего и т. д. на устойчивость пены;

- 2) с точки зрения возможности изоляции паров легковоспламеняющейся жидкости от источника горения, т. е. способна ли пена в тот или иной отрезок времени с момента ее получения быть достаточно устойчивой, чтобы не пропускать пары легковоспламеняющейся жидкости в зону горения.

В связи с этим данную работу проводили по двум направлениям:

- 1) определяли устойчивость воздушно-механической пены, получаемой из 2%-ного раствора пенообразователя ПО-1, по отношению к ряду горючих жидкостей, слой которых прогревался до различных температур; при этом устойчивость пены характеризовалась скоростью синерезиса;

- 2) определяли способность пены различной степени устойчивости изолировать горючие пары от источника поджигания.

II

Условно пену можно представить как слой жидкости определенной толщины, образованный стенками пузырьков. Чем меньше будут размеры пузырьков в определенном слое пены, тем больше будет этот условный слой жидкости и тем выше будут изолирующие свойства пены. По мере старения пузырьков пены в результате синерезиса стенки пузырьков будут становиться тоньше, условный жидкостный слой уменьшаться и изолирующие свойства пены снижаться. Чтобы проникнуть в зону горения, пары горючей жидкости должны продиффундировать или прорваться через слой пены, т. е. через условный жидкостный слой.

Следовательно, чем больше будет толщина подобного слоя (это зависит как от устойчивости пены, так и от интенсивности подачи), тем лучше будут изолирующие свойства пены.

Говоря о тушении легковоспламеняющихся жидкостей, некоторые авторы [2] делят их на два класса. К первому классу относятся жидкости, температура вспышки которых выше температуры жидкости, находящейся в пене. Ко второму классу относятся жидкости, температура вспышки которых ниже температуры жидкости, содержащейся в пене.

Соответственно с этим в первом случае решающим фактором при тушении считается охлаждение, во втором — изоляция.

Нам кажется, что это мнение неправильно. Это может относиться лишь к непрогретому слою горячей жидкости.

Тушение легковоспламеняющихся жидкостей осуществляется в любом случае по единой схеме. Существует определенная критическая температура поверхностного слоя жидкости, выше которой пены при заданной интенсивности подачи не оказывают изолирующего действия. В начале необходимо охладить легко воспламеняющуюся жидкость до критической температуры и лишь после этого вступает в действие фактор изоляции. В начальной стадии тушения устойчивость пены не имеет большого значения, и лишь после снижения температуры поверхностного слоя жидкости до критического значения устойчивость пены приобретает решающую роль. Поэтому особенно трудно осуществить тушение тех жидкостей, которые при горении образуют так называемый прогретый гомотермический слой (бензин, нефть) и сравнительно легко тушатся жидкости, не образующие этого слоя (керосин, дизельное топливо).

Пена для лабораторных исследований получалась на механической мешалке [5] путем перемешивания 2%-ного раствора пенообразователя ПО-1 при помощи возвратно-поступательного движения перфорированных дисков. Кратность пены во всех определениях была постоянной и равнялась 7. Качество пены определялось, временем выделения 50% жидкой дисперсной среды. Эта величина, как показали проведенные работы [6], является довольно показательной для характеристики качества пены.

Для получения пены с различной устойчивостью варьировалось время, затраченное на ее получение. В отдельных опытах пена получалась в течение 15, 30, 60 и 120 сек. Время выделения 50% жидкости из пены соответственно было равно 1 мин. 35 сек.; 2 мин. 50 сек.; 3 мин. 35 сек. и 4 мин. 50 сек.

Устойчивость пены по отношению к различным легковоспламеняющимся жидкостям как при комнатной, так и при повышенных температурах определялась скоростью синерезиса.

Определения проводились в приборе, изображенном на рис. 1. Температура легко воспламеняющейся жидкости поддерживалась при помощи контактного термометра с точностью $\pm 1-2^\circ$.

Этот прибор позволял исследовать скорость разрушения пены в зависимости от структуры жидкости, на которую наносится пена, температуры ее и качества получаемой пены.

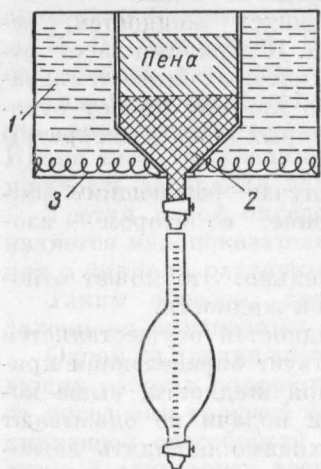


Рис. 1. Прибор для определения устойчивости пены.

1 — водяная баня; 2 — внутренний сосуд с пеной, горючей жидкостью и краном для сливания отсека; 3 — нагревательный элемент.

Подлежащую исследованию пену в количестве 300 см^3 наносили на поверхность жидкости. Первый замер, выделившейся из пены жидкости производился через 1 мин. после ее получения. Количество горючей жидкости, находящейся в приборе, составляло 250 мл .

В результате разрушения пены из нее выделяется около 40 см^3 жидкости, которая производит некоторое охлаждающее действие на горючее. Ввиду малого снижения температуры этим охлаждающим действием можно пренебречь.

В качестве горючих жидкостей применяли бензол, толуол, *n*-ксилол, гексан, гептан, октан, бензин Б-70 и тракторный керосин.

В табл. 1 приведены результаты измерений устойчивости пены на различных жидкостях. Измерения проводились при температуре горючего, равной 20° .

Таблица 1

Время с момента получения пены, мин.	Наименование горючей жидкости					
	бензол	толуол	ксилол	гексан	гептан	октан
	Объем выделившейся из пены жидкости, см^3					
1	0	0	0	0	0	0
2	—	—	—	7,5	9,5	9,5
3	14	27	29	15	17,5	17
5	22	35	37	24,5	27,5	25,5
7	28,5	38	40	29	34	32
9	31	39	—	35	37,5	36,5
11	33	40	—	37	40	40
13	34,5	—	—	37,5	—	—
15	35,5	—	—	38,5	—	—
17	37,5	—	—	40	—	—
19	39	—	—	—	—	—
21	40	—	—	—	—	—

Анализируя полученные данные, можно сказать, что разрушение пены при указанных температурах не зависит от упругости пара жидкости, а целиком зависит от ее индивидуальных свойств и, в частности, от химической структуры. Так, например, упругость паров гексана при 20° составляет 121 мм, а упругость паров ксилола 6,5 мм. Однако полное разрушение пены на гексане происходит через 17 мин., а на ксилоле — через 7 мин. При этом следует заметить, что в ряду бензола скорость разрушения пены возрастает в порядке бензол — толуол — ксилол, несмотря на то, что упругость паров указанных жидкостей уменьшается в такой же последовательности. Приблизительно эту же картину наблюдаем в ряду гексан — гептан — октан.

Таким образом, при указанной выше температуре наблюдаем резко выраженное влияние структуры углеводородной жидкости на устойчивость пены.

Показательным является также тот факт, что наименьшее разрушающее действие на пену оказывает бензол, не имеющий в своем кольце реакционноспособных групп, какие имеются, например, у толуола и ксилола. Между толуолом и ксилолом в их разрушающем действии на пену имеется лишь небольшая разница. По отношению же к бензолу указанные продукты образуют резкий скачок в сторону усиления их разрушающего действия на пену.

Углеводородные жидкости, как гексан, гептан, октан, отличающиеся друг от друга лишь на группу $-\text{CH}_2-$ и имеющие аналогичное строение, мало чем отличаются в отношении разрушающего действия их на пену.

Предположительно это можно объяснить энергией разрыва связей, что хорошо подтверждается в ряду бензол — толуол — ксилол. Данные энергии разрыва связей в ккал по Н. Н. Семенову [7] для указанных веществ приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что между энергиями разрыва связей ксилола и толуола имеется небольшая разница. Однако уже по отношению к бензолу эта разница достигает значительной величины.

Следует заметить, что аналогичную картину наблюдаем и в разрушающем действии этих веществ на пену.

При тушении горящих нефтепродуктов значительное влияние на устойчивость пены оказывает также тепловое воздействие жидкости.

Исследуя механизм тушения пенами, ряд авторов [2] в основном ограничивался изучением влияния факела горячей жидкости, оставляя в стороне воздействие собственно нагретой поверхности горячей жидкости.

Особенно сильное действие оказывает горячая жидкость при наличии прогретого слоя. Часто, рассматривая вопрос о влиянии пены на охлаждение прогретого слоя [4], исследователи не отра-

Таблица 2

$\begin{matrix} R' \\ R'' \end{matrix}$	H
C_6H_5-	104.0
$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2-$	77.5
$n\text{C}_6\text{H}_5\text{C}_6\text{H}_4\text{CH}_2-$	75.0

жали вопроса — влияния тепла прогретого слоя на устойчивость пены. В 1958 г. нами рассматривался этот вопрос при исследовании устойчивости пены методом светопоглощения [5].

В данной работе это явление изучалось более подробно. Влияние тепла нагретой поверхности горячей жидкости более детально

проверено нами на бензоле. Полученные данные приведены на рис. 2.

Из полученных данных видно, какое резкое влияние оказывает температура прогретой жидкости на устойчивость воздушно-механической пены. При температуре слоя бензола 65° более половины жидкости из пены выделяется уже в течение первой минуты. Учитывая тот факт, что как устойчивую характеризуем такую пену, которая еще содержит в своем составе не менее половины жидкости, взятой для ее получения, а также то, что, как показали проведенные

Рис. 2. Влияние температуры прогретого слоя бензола на устойчивость воздушно-механической пены.

опыты [4], время покрытия пеной поверхности горячего составляет порядка 1 мин., можно сделать вывод, что успешное тушение пеной бензола будет осуществляться лишь при снижении температуры бензола в пределах 50—60°.

Таблица 3

Время с момента получения пены, мин.	Наименование жидкости и температура					
	гексан		гептан		октан	
	20° С	50° С	20° С	50° С	20° С	50° С
	Объем выделившейся из пены жидкости, см ³					
1	0	4.0	0	5.0	0	6.0
2	7.5	15.0	9.5	22.0	9.5	20.0
3	15.0	25.0	17.5	32.5	17.0	33.0
5	24.5	36.5	27.5	40.0	25.5	40.0
7	29.0	40.0	34.0	—	32.0	—
9	35.0	—	36.5	—	36.5	—
11	37.0	—	40.0	—	40.0	—
13	37.5	—	—	—	—	—
15	38.5	—	—	—	—	—
17	40.0	—	—	—	—	—

Такое же сильное действие на устойчивость пены оказывают и прогретые слои других горючих жидкостей. Данные о их влиянии на устойчивость пены для гексана, гептана и октана приведены в табл. 3.

В зависимости от качества получаемой пены наблюдаем различную скорость разрушения ее на поверхности горючей жидкости. Пена, характеризующаяся временем выделения 50%-ной дисперсионной среды, равной 4'50'', 3'35'' и 2'50'', наносилась на поверхность бензола, температура которого была равна 20 и 50°. Результаты измерений представлены в табл. 4.

Таблица 4

Время с момента получения пены	Температура бензола и устойчивость пены					
	20° C			50° C		
	4'50"	3'35"	2'50"	4'50"	3'35"	2'50"
	Объем выделившейся из пены жидкости, см ³					
1'	0	0	11,0	10,0	21,0	31,0
1'30"	—	—	—	—	—	40,0
1'45"	—	16,0	28,0	—	40,0	—
3'	14,0	28,0	36,0	39,5	—	—
5'	22,0	36,0	38,0	40,0	—	—
7'	28,5	38,0	40,0	—	—	—
9'	31,0	39,5	—	—	—	—
11'	33,0	40,0	—	—	—	—
13'	34,5	—	—	—	—	—
15'	35,5	—	—	—	—	—
17'	37,5	—	—	—	—	—
19'	39,0	—	—	—	—	—
21'	40,0	—	—	—	—	—

Рассматривая полученные данные, видим, что наряду с большим влиянием прогретого слоя жидкости, на который наносится пена, качество ее также оказывает значительное воздействие на скорость разрушения пенного покрова.

Таким образом, можем заключить, что на устойчивость пены, нанесенной на поверхность прогретой горючей жидкости, оказывают влияние в основном следующие факторы:

- 1) тепло, получаемое ею от прогретого слоя жидкости;
- 2) структура горючей жидкости;
- 3) качество воздушно-механической пены.

Причем можно констатировать, что наиболее существенное влияние на скорость разрушения пены оказывает тепловое воздействие горючей жидкости.

III

Выше рассматривали вопрос о влиянии различных факторов (структуры горючей жидкости, температуры, качества пены) на скорость разрушения пены, нанесенной на поверхность горючего. Но одна эта величина еще ничего не говорит об огнетушащей способности пены, которую до некоторой степени можно характеризовать ее изолирующей способностью.

Следует различать влияние горючей жидкости на скорость разрушения пены и способность к загоранию горючей жидкости, которая определяется главным образом упругостью паров. Эти два фактора в сочетании друг с другом и определяют в конечном итоге изолирующую способность пены по отношению к той или иной легковоспламеняющейся жидкости.

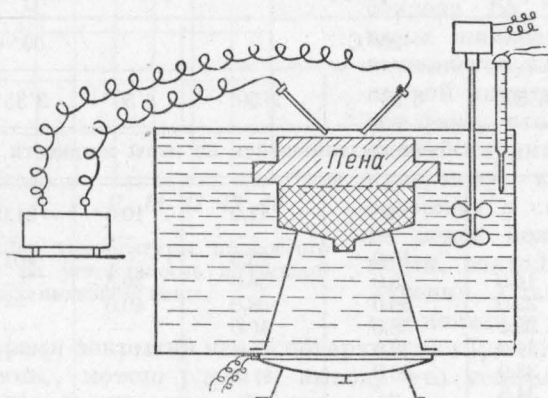


Рис. 3. Прибор для определения изолирующей способности пены.

Изолирующую способность пены мы проверяли в приборе, изображенном на рис. 3. Прибор представляет собой металлический сосуд, заключенный в водяную или глицериновую баню. Температура в бане поддерживается с точностью $\pm 1-2^\circ$ при помощи контактного термометра.

В сосуд наливается исследуемая жидкость, которая выдерживается в нем до получения требуемой температуры, после чего на ее поверхность наносится определенный слой пены.

Над поверхностью пены крепятся два электрода, соединенные с индукционной катушкой. Через заданные отрезки времени над пеной дается искра, которая и вызывает загорание паров жидкости, прошедших через слой пены. Изолирующая способность пены характеризуется временем, прошедшим от момента нанесения пены на поверхность горючей жидкости до момента загорания ее паров.

Как было показано выше, структура жидкости по-разному влияет на скорость разрушения пены. Очевидно, это влияние будет сказываться также и на изолирующей способности пены.

Однако при оценке изолирующей способности пены наряду с выявленным влиянием температуры прогретого слоя жидкости будет иметь значение также и соответствующая ей упругость паров горючего, на которое наносится пена.

Очевидно, при более высоких температурах будет происходить не только диффузионное распространение паров, а так же более интенсивный прорыв парами пенного покрова, устойчивость которого ослаблена влиянием как структуры, так и температуры поверхности жидкости.

В табл. 5 приведено изменение изолирующей способности пены, выраженной временем в секундах, при нанесении ее на различные горючие жидкости с температурой прогретого слоя 20° и 50°.

Таблица 5

Наименование жидкости	Температура	
	20° C	50° C
	Время в секундах	
Бензол	1680	83
Толуол	1560	73
n-Ксилол	Не воспл.	115
Гексан	427	90
Гептан	790	230
Октан	Не воспл.	315

Анализируя полученные данные, можем заметить, что изолирующая способность пены зависит от структуры горючих жидкостей. Кроме того, в каждом гомологическом ряду имеется зависимость времени загорания от упругости паров.

У жидкостей с низкой упругостью пара при 20°, как n-ксилол ($P_{t=20^\circ} = 6,5$ мм) и октан ($P_{t=20^\circ} = 10,4$ мм), воспламенения совсем не происходит, если над ними имеется даже небольшой слой пены.

Слой жидкости, нагретый до высокой температуры, с которым контактирует пена (как это было показано выше, см. рис. 2 и табл. 3), оказывает довольно сильное влияние на скорость разрушения пены. Кроме того, с повышением температуры возрастает упругость паров исследуемой жидкости. Все это и вызывает резкое ухудшение изолирующих свойств пены.

Таким образом, при повышенных температурах изолирующую способность пены необходимо рассматривать, исходя из наличия трех факторов: 1) структуры жидкости; 2) температуры прогретого слоя жидкости; 3) упругости пара жидкости.

Влияние этих факторов также хорошо иллюстрируется данными табл. 5.

Так, несмотря на довольно слабое действие, которое оказывает гексан на разрушение пены при 50°, изолирующее действие пены по отношению к нему мало, так как при этой температуре упругость паров гексана равна 405 мм. Несмотря на малую упругость пара толуола при 50° (92 мм), он обладает слабой изолирующей способностью ввиду того, что пена при контакте с ним разрушается очень сильно (см. табл. 1).

Очевидно, что для каждой индивидуальной жидкости имеется своя критическая температура, при нагреве выше которой пена по отношению к ней уже не обладает изолирующими свойствами.

На описанном выше приборе нами проверялась изолирующая способность пены вплоть до критической. Полученные данные приведены в табл. 6.

Таблица 6

Наименование	Температура, °C										
	20	35	50	55	60	65	70	80	85	90	95
	Время в секундах										
Бензол . .	1680	315	83	—	—	50	—	—	—	—	—
Толуол . .	1560	—	73	—	—	52	—	—	—	—	—
Гексан . .	427	—	90	80	68	55	—	—	—	—	—
Гептан . .	790	435	230	—	—	165	—	50	—	40	—
Октан . . .	Не воспл.	—	315	—	—	155	—	—	—	65	40

Под критической изолирующей способностью условно понималась способность пены изолировать пары горючей жидкости в промежутке времени менее 1 мин. с момента ее получения. Учитывая тот факт, что с момента получения пены до ее нанесения на поверхность горючего проходит, как правило, 10—12 сек., то фактическое время изоляции будет меньше на эту величину. Данное время в качестве критического было выбрано по той причине, что опытами 1956 г. [4] было установлено время растекания пены по поверхности горючего, приблизительно равное этой величине.

Полученные данные говорят о том, что для успешного тушения прогретого слоя горючей жидкости пенами необходимо подать их в таком количестве, чтобы первоначально выделяющаяся из них жидкость охладила горючее ниже какой-то критической температуры, после чего наступает собственно процесс тушения.

В проводимой работе проверялось также влияние качества

самой пены на ее изолирующую способность по отношению к горючей жидкости.

Для исследований были взяты пены, время получения которых составляло: 120, 60, 30 и 15 сек. Время выделения 50% жидкой дисперсионной среды соответственно равнялось 4'50'', 3'35'', 2'50'' и 1'35''.

В качестве горючей жидкости был выбран бензол.

Пена различной устойчивости наносилась на поверхность бензола, слой которого имел температуру, равную 20, 35, 50 и 65°. При этом было выявлено, что с ростом температуры качество самой пены меньше сказывается на ее изолирующих свойствах. Полученные данные представлены на рис. 4.

Анализируя полученные данные, видим, что даже при температуре 65° качество пены почти не влияет на ее изолирующие свойства и, очевидно, имеется для каждой жидкости такая температура, при которой пена, поданная на ее поверхность, будет почти мгновенно разрушаться. Из этого вытекает, что нецелесообразно осуществлять тушение прогретых слоев горящей жидкости с применением лишь одних пен. Эффективнее было бы проводить тушение, охладив в начале прогретый слой тем или иным способом до какой-то определенной температуры (например, распыленной водой, перемешиванием) с последующей подачей пены.

Изложенные исследования были проведены нами над индивидуальными веществами.

Полученные выводы были проверены над такими сложными жидкостями, как бензин Б-70 и тракторный керосин.

Для этих жидкостей проверялись как скорость разрушения пены, нанесенной на поверхность слоя, прогретого до различных температур, так и изолирующая способность вплоть до критической. Полученные данные представлены в табл. 7, 8 и 9.

Анализируя полученные данные, видим, что они хорошо согласуются с исследованиями, проведенными над индивидуальными веществами.

Кроме того, еще раз убеждаемся, что высокая критическая температура, полученная для изолирующей способности пены по отношению к керосину, равная 110—115°, говорит о сравнительной легкости его тушения в практических условиях.

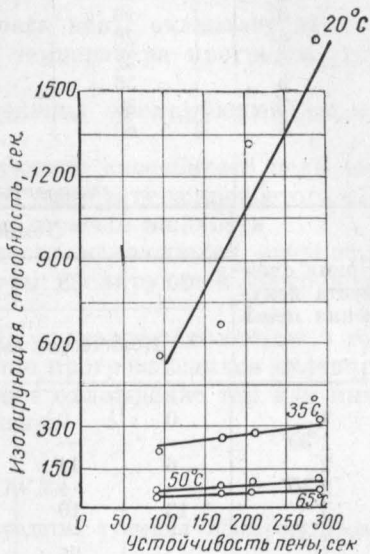


Рис. 4. Влияние температуры прогретого слоя бензола и качества устойчивости воздушно-механической пены на ее изолирующие свойства.

Таблица 7

Скорость синерезиса пены

Время, прошедшее с момента получения пены, мин.	Температура слоя бензина, °C				
	20	35	50	70	77
	Количество выделившейся из пены жидкости, мл				
1	0	2,0	2,5	6,5	10
2	10	13,5	20,0	30,0	34
3	19	24,0	32,5	40,0	40
4	26	32,0	40,0	—	—
5	32	38,0	—	—	—
6	36	40,0	—	—	—
7	38	—	—	—	—
8	40	—	—	—	—

Таблица 8

Скорость синерезиса пены

Время с момента получения пены	Температура слоя керосина, °C						
	20	35	50	80	100	105	110
	Количество выделившейся из пены жидкости, мл						
1'	0	0	0	6,5	10	15	16
1'30"	—	—	—	—	—	28	29
2'	6	11	11	25,0	35	37	40
2'30"	—	—	—	—	40	40	—
3'	13	19	19	36,0	—	—	—
3'30"	—	—	—	40,0	—	—	—
4'	—	25	27	—	—	—	—
5'	25	31	32,5	—	—	—	—
7'	33	40	40	—	—	—	—
9'	40	—	—	—	—	—	—

Таблица 9

Изолирующая способность пены

Наименование жидкости	Температура слоя жидкости, °С										
	20	35	50	70	77	80	90	100	105	110	115
	Время в секундах										
Бензин Б-70 . .	420	300	170	80	55	—	—	—	—	—	—
Тракторный керосин	Не воспл.	Не воспл.	Не воспл.	—	—	135	120	100	85	68	35 вскипание

Если сравнить эти результаты с данными, полученными В. И. Блиновым, Г. Н. Худяковым и В. П. Лосевым в 1956 г. [8], можно заметить также следующее.

Во всех опытах по тушению горящего бензина прекращение горения наступало при температуре слоя в среднем 60° . Учитывая влияние факела, который вызывает дополнительное разрушение пены, можем говорить о хорошем совпадении с полученной нами критической температурой, равной 77° .

Выводы

1. Показано, что на устойчивость пены оказывает влияние ее качество, химический состав и температура прогретого слоя горючей жидкости.

2. Разработана методика определения изолирующей способности пены.

3. Установлено, что на изолирующую способность пены оказывает влияние структура жидкости, температура прогретого слоя и связанная с ней упругость паров горючей жидкости.

4. Для исследованных легковоспламеняющихся жидкостей определены критические температуры изолирующей способности пены.

5. На основе проведенной работы делается заключение о том, что целесообразно проводить тушение прогреваемых нефтепродуктов, применяя их предварительное охлаждение тем или иным способом с последующей подачей пены.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рябов И. В. Современные средства тушения пожаров пенами, изд. МКХ РСФСР, 1956.
2. Путенихин Б. Д. Отчет ЦНИИПО МВД СССР, 1953.
3. Блинов В. И., Худяков Г. Н. Информационный сборник, изд. МКХ РСФСР, 1958.
4. Лосев В. П., Казаков М. В. Информационный сборник, изд. МКХ РСФСР, 1958.
5. Казаков М. В. Информационный сборник ЦНИИПО, 1958.
6. Лосев В. П., Казаков М. В. Отчет ЦНИИПО МВД СССР, 1958.
7. Семенов Н. Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. Изд. АН СССР, М., 1954.
8. Блинов В. И., Худяков Г. Н., Лосев В. П. Отчет ЦНИИПО МВД СССР, 1956.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

	Стр.
В. И. Блинов. О механизме горения нефтепродуктов в резервуарах	4
В. И. Блинов. О некоторых вопросах, относящихся к горению и тушению пламени жидкостей в резервуарах	22
И. И. Петров, В. Ч. Реутт. Тушение пламени жидких топлив методом перемешивания	30
В. А. Герасимов, И. И. Петров, В. Ч. Реутт. Тушение пламени нефтепродуктов распыленной водой	84
В. А. Герасимов, И. И. Петров, В. Ч. Реутт, Р. М. Цыган, Л. К. Ягубян. Комбинированные методы тушения пожаров нефтепродуктов в резервуарах	99
В. П. Лосев, М. В. Казаков. Разработка методики определения устойчивости и кратности пены из пенообразователей ПО-1 и ПО-6	125
М. В. Казаков. К вопросу исследования устойчивости и изолирующей способности воздушно-механической пены	135

*Центральный научно-исследовательский институт
противопожарной обороны ЦНИИПО*

НОВЫЕ СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ТУШЕНИЯ ПЛАМЕНИ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Сборник статей

Ведущий редактор *П. Р. Ершов*

Корректор *И. М. Анисимова*. Технический редактор *Л. В. Ганина*

Подписано к набору 11/III 1960 г. Подписано к печати 4/V 1960 г.
 Формат 60×92¹/₁₆. Печ. л. 9,25. Уч.-изд. л. 9,36.
 Т-04767. Тираж 8500 экз. Зак. 268/2066. Цена 6 р. 20 к.

Гостоптехиздат. Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.
 Типография «Красный Печатник». Ленинград, Московский проспект, 91.