

**Л.А. Витман, Б.Д. Кацнельсон, И.И.
Палеев**

Распыливание жидкости форсунками

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
Л11

Л11 **Л.А. Витман**
Распыливание жидкости форсунками / Л.А. Витман, Б.Д. Кацнельсон, И.И. Палеев – М.: Книга по Требованию, 2014. – 266 с.

ISBN 978-5-458-48190-8

В книге изложены закономерности распада жидких струй и приведено обобщение опытных данных по распыливанию жидкости форсунками. Даны описания и основные характеристики различных типов распылителей и примеры расчета ряда форсунок. Рассмотрено горение отдельной капли и факела жидкого топлива. Книга предназначена для инженерно-технических работников и студентов старших курсов высших технических учебных заведений, занимающихся расчетом и конструированием энергетических и оросительных установок.

ISBN 978-5-458-48190-8

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2014

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2014

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

бензин, лигроин, керосин, соляровое масло и мазут. Все эти виды топлива получают из нефти. Рост добычи нефти в СССР виден из приводимых ниже цифр:

Год	Добыча нефти в СССР, млн. т	Год	Добыча нефти в СССР, млн. т
1913	10,3	1958	113,2
(в современ- ных границах)		1959	129,6
1928	11,6	1960	148,0
1935	25,2	1961	166,0
1940	31,1	1965	230—240
1945	19,4	(контрольные цифры развития народного хозяй- ства СССР)	
1950	37,9		
1955	70,8		

Значительный рост добычи нефти в СССР обусловил изменение топливного баланса страны и способствовал внедрению жидкого топлива в энергетику страны.

Мазут, получаемый в результате переработки добываемой нефти, будет в значительной своей части сжигаться в топках паровых котлов, а также в промышленных печах. Крайне важно обеспечить высокоэкономичное сжигание мазута в них при больших форсировках, что даст огромную экономию топлива, позволит уменьшить вес и габариты сжигающих устройств.

Способы сжигания жидкого топлива весьма разнообразны, так как зависят от производительности агрегата, его назначения и ряда других факторов. Для всех этих способов современная техника сжигания жидкого топлива считает обязательной стадию распыливания, ибо оно, усиливая теплообмен измельченного топлива с газовой средой и улучшая перемешивание частиц горючего с окислителем, способствует интенсификации процесса горения.

Нельзя не отметить, что до применения распыливания жидкое топливо почти не употреблялось для сжигания. Нефть в то время использовалась, как правило, лишь для получения масел и некоторых других химических продуктов. Керосин находил себе применение только для освещения. Бензин и мазут представляли собой нежелательные продукты перегонки нефти и нередко выливались как отбросы производства. Первая попытка «дробления» нефти привела к созданию весьма примитивных аппаратов, представлявших собою набор трубок, из которых вытекали сравнительно крупные капли, сжигавшиеся в объеме печей. Только

с появлением форсунок началось промышленное применение нефти и ряда ее составляющих как топлива.

Экономичность сжигания мазута в значительной мере определяется качеством его распыливания. Как будет видно из дальнейшего, для эффективного сжигания и устойчивого воспламенения не всегда нужен возможно более мелкий распыл. Необходим такой фракционный состав, который обеспечивал бы оптимальные условия развития процесса.

Огромное значение распыливания жидкости для решения ряда технических задач привело к созданию большого количества всевозможных конструкций форсунок. Появились и многочисленные исследования форсунок. Большинство этих исследований имело частный характер, относясь только к данному конкретному типу форсунок. Вместе с этим были поставлены и исследовательские работы по отысканию общих закономерностей, которые можно было бы распространить не только на испытанный тип форсунки при изменении ее производительности и условий работы, но и на другие форсунки, действующие по тому же принципу.

В настоящей книге изложена теория распыливания механическими и пневматическими (или паровыми) форсунками и даны основные расчетные рекомендации, вытекающие из обобщения материала и подтвержденные экспериментом. Здесь же рассмотрены распылители, нашедшие широкое применение в топочной практике стационарных паровых котлов, камер горения газовых турбин и промышленных печей. Материал изложен таким образом, чтобы его можно было использовать и в отраслях, применяющих распылители для других целей.

Широкий диапазон мощностей промышленных печей, энергетических топков и камер горения потребовал рассмотрения форсунок как малой, так и большой производительности.

Появившиеся в последнее время котельные агрегаты производительностью 500 *t* пара в час и выше и намечающийся еще более значительный рост единичной мощности котельных установок требуют создания форсунок с очень большим часовым расходом топлива. К сожалению, топочная техника располагает весьма ограниченными сведениями о работе форсунок такой мощности. В книге приводятся данные, которые, надо полагать, окажут помощь при конструировании распылителей большой производительности.

В отдельной главе рассмотрены вопросы, связанные с созданием высокоэффективного устройства (форсунки с предварительной газификацией) для подготовки топлива

к сжиганию с весьма высокими напряжениями объема и сечения. Там же помещены конструктивные схемы такого устройства.

Наряду с освещением вопросов, связанных с распыливанием жидкого топлива и с конструкциями форсунок, в книге уделено место материалам по горению единичной капли и факела жидкого топлива. Рассмотрены также некоторые принципы конструирования топочных устройств паровых котлов и камер горения газовых турбин, что необходимо для определения нужной тонкости распыливания и характера распределения капель жидкого топлива по сечению факела.

Главы книги 2, 3, 4 и 5 написаны Л. А. Витман; § 6-1—6-4 и гл. 7 — Б. Д. Кацельсоном; гл. 1, § 6-5 и гл. 10 — совместно обоими авторами; гл. 8 и 9 — И. И. Палеевым.

Материал книги обсуждался всеми авторами совместно и отражает их общую точку зрения на все затронутые вопросы. Авторы признательны рецензенту книги заслуженному деятелю науки и техники проф. Г. Ф. Кнорре за данные им весьма ценные указания и советы, которые были учтены при окончательном редактировании рукописи.

Замечания и отзывы на книгу просьба направлять по адресу: Ленинград, Д-41, Марсово поле, д. 1, Ленинградское отделение Госэнергоиздата.

Авторы

ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- A — геометрическая характеристика форсунки; опытные коэффициенты.
 c_{pp} — теплоемкость пара.
 $c_{ж}$ — теплоемкость жидкости.
 $c_{рг}$ — теплоемкость газа.
 c_k — концентрация кислорода.
 c_t — концентрация топлива.
 D — коэффициент диффузии.
 d, D — диаметр.
 E — энергия.
 G — расход жидкости, воздуха; количество пара, испаряющегося в единицу времени.
 g — вес; ускорение силы тяжести.
 H — гидродинамический напор.
 M — вес жидкой фазы в долях от начального.
 p, P — давление.
 Q — количество тепла.
 $q_{исп}$ — теплота испарения.
 $q_{гор}$ — теплота горения.
 q — инкремент колебаний.
 R — газовая постоянная.
 R_i — весовая доля капель размером больше d_i .
 R, r — радиус.
 S — количество дымовых газов.
 T, t, τ — время.
 T, t — температура.
 U, u, v, w — скорость.
 V — объем.
 x, y, z — координаты точки.
 \bar{x}, \bar{y} — относительный размер капле (в гл. 9).
- z_{O_2}, z_T — безразмерные концентрации кислорода и топлива.
 α — коэффициент избытка воздуха; угол; амплитуда колебаний; коэффициент теплоотдачи.
 β — вес кислорода, требуемый для сжигания 1 кг топлива; коэффициент объемного расширения.
 γ — объемный вес.
 δ — толщина пограничного слоя; пленки жидкости; безразмерный параметр.
 ε — эксцентриситет; коэффициент живого сечения.
 ϑ — безразмерная температура.
 θ — угол.
 λ — длина волны колебаний; коэффициент теплопроводности.
 μ — динамический коэффициент вязкости; коэффициент эмиссии факела.
 ν — кинематический коэффициент вязкости.
 ξ — коэффициент расхода форсунки; смещение поверхности струи.
 ρ — плотность.
 τ — время; касательное напряжение.
 σ — коэффициент поверхностного натяжения; константа испарения.
 Φ, θ — угловые координаты точки.
 φ — угол конусности струи.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ФОРСУНКАХ, ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Первая работоспособная форсунка для сжигания жидкого топлива была предложена А. И. Шпаковским в 1864 г. В дальнейшем большую роль сыграла форсунка, созданная в 1880 г. инж. В. Г. Шуховым. Благодаря технологичности, простоте конструкции и легкости изготовления она быстро нашла себе применение. Хотя форсунка Шухова и уступает некоторым современным типам форсунок в отношении удельного расхода пара, но она и поныне имеет довольно широкое распространение.

Вслед за первыми распылителями было создано огромное количество форсунок разных производительностей и разных принципов действия. Они отличаются друг от друга конструктивными особенностями, способами регулирования, числом ступеней распыливания, характером движения смеси топлива и распыливающей среды (воздуха, пара) и мн. др. Классифицировать все это многообразие форсунок лучше всего по принципу распыливания жидкости.

Известны два основных способа распыливания жидкости: механический и пневматический (или паровой). В соответствии с этим и форсунки делятся на две большие группы: механические и пневматические (или паровые). В последние годы стали применять форсунки комбинированного типа, так называемые воздушно-(паро-)механические, а также форсунки с предварительной газификацией.

Механические форсунки, в свою очередь; можно условно разбить на центробежные и прямого действия.

В центробежной форсунке топливо, подаваемое под значительным давлением, закручивается в каналах или в специальной вихревой камере, откуда через суженное сопло выбрасывается в объем, затопленный газом. Форсунки такого типа изготавливаются, в основном, на давление от 6 до 60 атм, в зависимости от необходимой степени дисперги-

рования, от заданной производительности и от требуемой дальности струи. Потребность в форсунках большой единичной производительности и повышенные требования к пределам регулирования заставили прибегнуть к разным конструктивным ухищрениям при использовании центробежного принципа распыливания. Так появились форсунки с обратным сливом жидкого топлива, с регулируемой площадью закручивающих отверстий, многосопельные, ротационные и др.

Применение больших скоростей в механических форсунках привело к уменьшению выходных отверстий сопел и тангенциальных отверстий вихревых камер. По этой причине форсунки механического распыливания требуют весьма тщательной очистки жидкости. Вместе с тем применение больших скоростей ограничило нижний предел расхода жидкости, так как размер отверстий нельзя делать чрезмерно малым — это мешает нормальной работе форсунки. Что касается верхнего предела, то ряд технических приемов и переход на повышенные давления позволили значительно поднять его: уже созданы форсунки с единичной мощностью в несколько тонн топлива в час.

В форсунках прямого действия топливо, как правило, подается под значительно большим давлением, чем в форсунках центробежного типа. Иногда оно даже превышает 1000 кг/см^2 . Такие форсунки применяются, главным образом, в двигателях внутреннего сгорания и в настоящей книге не рассматриваются.

Пневматические (или паровые) форсунки, где диспергирование в основном производится газовой струей, имеют более сложное хозяйство и более громоздкие коммуникации, чем механические форсунки. Но они выгоднее механических благодаря тому, что менее требовательны к обработке деталей и к очистке топлива.

Это объясняется тем, что поскольку объем газа, проходящего через сопло, как правило, в сотни раз превышает объем сжигаемого жидкого топлива, то и диаметр выходного отверстия приходится делать много большим, а стало быть, и менее чувствительным к засорению, чем в механических форсунках. Что касается отверстия для вытекания мазута, то оно имеет также увеличенные размеры, так как жидкое топливо, как правило, вытекает с большими скоростями (1—3 м/сек).

Форсунки воздушного распыливания можно условно разбить на две основные группы — низкого и высокого давления. К первой относятся форсунки с давлением распы-

дивающего агента до 1000 мм вод. ст., ко второй — с давлением от одной атмосферы и выше. Имеются и форсунки среднего давления, работающие в диапазоне давлений от 1000 мм вод. ст. до 1 атм. Но эти форсунки не нашли себе широкого применения в промышленности.

Как уже упоминалось, в форсунках механического распыливания для лучшего диспергирования обычно создаются высокие скорости движения жидкости в камере завихрения или в закручивающей вставке и еще бóльшие — в выходном сопле. Чтобы преодолеть сопротивление по тракту и создать большие скорости, требуется высокий напор в линии подачи жидкости.

В форсунках пневматического распыливания дело обстоит иначе. Здесь дробление струи зависит, в основном, от движения газовой среды; поэтому движению газовой среды и придают большие скорости. В то же время скорость движения жидкости крайне мала. Напор в магистрали подачи жидкости необходим лишь для обеспечения транспортировки требуемого количества жидкости к устью форсунки. Поэтому в некоторых конструкциях, где применен эжекционный принцип, газовая струя играет роль подсосывающего фактора и напор жидкости не превышает, как правило, нескольких десятых долей атмосферы. В других конструкциях пневматических форсунок напор в линии подачи жидкости может составить 2 атм и даже более.

Скорость газовой струи в пневматических форсунках в ы с о к о г о н а п о р а достигает сотен метров в секунду. В соответствии с этим давление газа, как правило, составляет 3—7 атм, а иногда и больше. В этих форсунках вместо воздуха часто пользуются паром давлением 3—12 атм. Иногда применяют пар и более высокого давления — до 25 атм.

Расход воздуха на распыливание топлива в форсунках высокого напора составляет 7—10% от теоретически необходимого для горения. Весь остальной воздух, необходимый для сжигания топлива, подают, как правило, через специальные устройства — регистры.

Проведенные исследования показали, что хорошее диспергирование обеспечивается, если на 1 кг топлива расходуется 1 кг распыливающего воздуха или 0,5—0,7 кг распыливающего пара.

Пневматические форсунки высокого напора бывают прямоструйными и центробежными. Среди прямоструйных форсунок следует выделить группу так называемых эжекционных форсунок, нашедших

весьма широкое применение в энергетике и промышленных печах. Эжекция обеспечивается либо соплом Лаваля (в круглых форсунках), либо особым расположением щелей (в форсунках плоского типа). Форсунки центробежного типа, в которых воздушный (или паровой) поток закручивается в особых каналах или в объеме, мало используются в энергетике, но в последнее время находят применение при сжигании жидкого топлива в камерах горения газовых турбин.

При малых расходах топлива форсунки высокого напора не дают удовлетворительного распыливания. Поэтому они работают большей частью с расходом не ниже 100 кг/час . Исключением является форсунка Шухова, первые номера которой могут применяться и при очень малых расходах. Что касается максимальной производительности форсунок высокого давления, то она зависит от их конструкции. В энергетике в основном применяют форсунки, расходующие до 2, а на промышленных печах — до 3 т мазута в час.

Форсунки низкого напора применяются, в основном, в печной технике. Как правило, они работают только с воздушным дутьем, но в отдельных конструкциях, предназначенных для сжигания высоковязких мазутов, предусмотрена подача, наряду с воздухом, и небольшого количества пара. Последний играет, по существу, роль подогревателя топлива в пределах самой форсунки. Расход воздуха в этих форсунках составляет примерно 50—100% того количества его, которое необходимо для сжигания топлива. Скорость воздуха в месте распыливания составляет около 50—70 м/сек, а иногда достигает и 100 м/сек. Воздух в форсунки низкого напора подают, как правило, незакрученным. Однако имеются и конструкции, в которых осуществлена закрутка потока. Во многих конструкциях применен принцип двухступенчатого распыливания.

Рассчитаны форсунки низкого напора на работу с малой производительностью. Некоторые из них дают удовлетворительное распыливание при крайне низком расходе, составляющем всего $1,5 \text{ кг/час}$. Этому способствует относительно большой диаметр выходного сопла. Обычно же форсунки низкого напора применяются при расходе топлива до 150 кг/час . В форсунках отдельных типов расход может быть доведен до 200 и даже до 300 кг/час .

Появившаяся в последнее время тенденция к созданию воздушно-механических форсунок объясняется стремлением использовать преимущества обоих спо-

способ распыливания жидкости. Такие комбинированные форсунки отличаются некоторой усложненностью конструкции, но зато расходы воздуха у них весьма малы, а давление во воздушному тракту не превышает 2 *атм.* К тому же комбинированная конструкция обеспечивает широкие пределы изменения расхода без заметного ухудшения качества распыливания, что особенно важно для камер горения газовых турбин. Компрессор небольшой производительности может обеспечить хорошую работу воздушно-механической форсунки с большим расходом топлива. Такие распылители несомненно найдут свое место и в большой энергетике.

Прохождение жидким топливом ряда стадий до его выгорания натолкнуло исследователей на мысль создать форсунки с предварительной газификацией. Требования, предъявляемые к распыливающим устройствам этого рода, весьма невелики, так как подводимое к ним нагретое и перегретое до высокой температуры жидкое топливо при достаточно грубом распыливании испаряется и газифицируется в специальной камере. Такая организация процесса благоприятствует наилучшему смешению кислорода с топливом, что обеспечивает выгорание при весьма малом избытке воздуха и регулирование расходов топлива в широких пределах. Короткий факел дает высокие напряжения объема и сечения топочной камеры.

Чтобы рассчитать (или подобрать) форсунку, необходимо располагать следующими исходными данными и основными техническими требованиями:

- а) производительность форсунки (расход жидкости) G , *кг/час*;
- б) требуемая тонина распыливания, определяемая средним диаметром капель в струе и распределением капель по размерам;
- в) угол конусности струи;
- г) плотность орошения, т. е. количество жидкости, проходящей в единицу времени через единицу площади живого сечения струи;
- д) дальнобойность струи.

Важную роль в расчете форсунок играет определение среднего диаметра капель, для чего существует ряд формул:

- 1) среднеарифметический диаметр:

$$d_{ap} = \frac{\sum n_i d_i}{N}, \quad (1-1)$$

где n_i — число капель диаметра d_i ; $N = \sum n_i$ — сумма всех капель; при таком методе осреднения удельное содержание капель определяется их относительным количеством; между тем большое количество малых капель составляет лишь незначительную часть общей массы распыленной жидкости, а это значит, что такое осреднение не учитывает распределения массы жидкости по каплям;

2) среднемассовый диаметр:

$$d = \frac{\sum g_i d_i}{G} = \frac{\sum n_i d_i^4}{\sum n_i d_i^3}, \quad (1-2)$$

где g_i — вес капель размера d_i ;

3) в некоторых случаях за средний принимается размер капли, отношение объема которой к ее поверхности равно отношению суммарного объема всех капель к их поверхности (средний диаметр по Заутеру):

$$d_s = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2}; \quad (1-3)$$

4) средний диаметр выводят также из условия, что отношение диаметра капли среднего размера к ее объему равно отношению суммы всех диаметров капель к объему всех капель:

$$d_p = \sqrt{\frac{1}{\sum \frac{V_i}{d_i^2}}}; \quad (1-4)$$

5) за средний можно принимать также диаметр капли, объем которой равен среднеарифметическому объему всех капель:

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i}}; \quad (1-5)$$

6) средним можно считать также диаметр капли, поверхность которой равна среднеарифметической поверхности всех капель:

$$d_F = \sqrt{\frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i}}; \quad (1-6)$$

7) среднелогарифмический диаметр:

$$\lg d_l = \frac{\sum g_i \lg d_i}{G}; \quad (1-7)$$