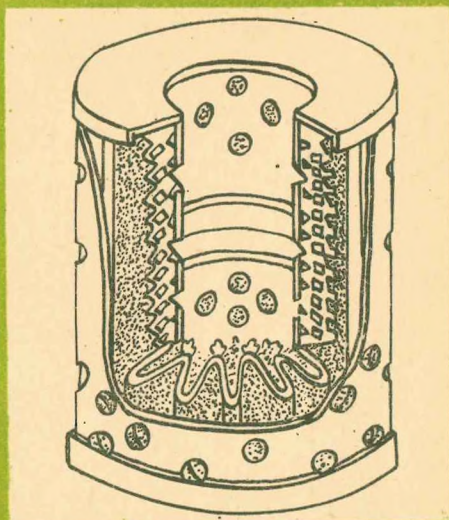


Э. И. УДЛЕР, В. И. ЗУЕВ

ФИЛЬТРУЮЩИЕ ТОПЛИВНО-МАСЛЯНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ИЗ БУМАГИ И КАРТОНА



89

Э. И. УДЛЕР, В. И. ЗУЕВ

ФИЛЬТРУЮЩИЕ
ТОПЛИВНО-МАСЛЯНЫЕ
ЭЛЕМЕНТЫ
ИЗ БУМАГИ И КАРТОНА



ИЗДАТЕЛЬСТВО ТОМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Томск — 1983

Удлер Э. И., Зуев В. И. **Фильтрующие топливно-масляные элементы из бумаги и картона.** — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1983. — 5,85 л. — 90 коп. 500 экз. 3603030000.

В книге рассматриваются вопросы применения, конструкция и методы расчета фильтрующих элементов из современных фильтровальных бумаг и картонов. Приводится конструктивная классификация фильтрующих элементов, предназначенных для очистки нефтяных топлив, масел и гидравлических жидкостей. Рассматриваются свойства и методы расчета гидравлических свойств и эффективных показателей фильтровальных материалов. Уделено внимание вопросам расчета, проектирования и оптимизации фильтрующих элементов из бумаги и картона.

Книга написана по материалам обзорного характера. В ней использованы также результаты исследований авторов.

Предназначена для инженеров и научных работников, занятых в области исследования и разработки средств очистки нефтяных топлив, масел и специальных жидкостей. Она будет также полезна студентам вузов, получающим соответствующие специальности.

118

Рецензент — Ю. Е. Тябликов

Редактор — Г. Г. Медведев

У 3603030000 — 111 — 83
177(012) — 83

ВВЕДЕНИЕ

Постоянный рост выпуска различных видов продукции машиностроения, а также транспортных средств, использующих нефтяные топлива, масла и специальные жидкости, требует повышения их чистоты.

Установлено, что повышение тонкости очистки жидкости в гидравлической системе до 5 мкм увеличивает срок службы насосов более чем в 10 раз, а гидроаппаратуры — в 5—7 раз. При очистке с тонкостью 10 мкм износ гидрооборудования строительно-дорожных машин, вызываемый загрязненностью рабочей жидкости, практически прекращается. Применение очистки дизельных топлив с тонкостью 13 мкм увеличивает срок службы плунжерных пар топливных насосов в 3,5 раза, применение полнопоточной фильтрации моторного масла с тонкостью 15—20 мкм увеличивает срок службы основных деталей двигателя в 1,5—3 раза.

Таким образом, чистота нефтяных топлив и масел является одним из важных факторов увеличения надежности и долговечности техники.

В практике эксплуатации машин и механизмов требуемая чистота применяемых топлив и масел достигается использованием различных способов очистки. Все существующие способы можно условно разделить на две группы: к первой относится способ фильтрования, а ко второй — способы, основанные на использовании разнообразных силовых полей (гравитационный, центробежный, акустический, электрический и т. д.).

Не вдаваясь в обсуждение и сравнительный анализ известных способов очистки, можно уверенно констатировать наиболее широкое распространение и практическое использование фильтрования как достаточно простого по реализации и эффективного по качественным показателям.

Фильтрующие устройства различных типов широко применяются на всех стадиях очистки нефтепродуктов

(транспорт и хранение, заправка, системы топливоподачи и смазка, гидроприводы и т. д.) [1—10]. Разработкой и внедрением фильтров в различные области народного хозяйства заняты многие ведущие организации и отраслевые институты страны.

Основой любого фильтра для нефтяных топлив и масел является фильтрующий элемент, укомплектованный пористым материалом с различной формой укладки, обеспечивающим необходимое качество очистки.

В последние годы разработаны основы технологии производства фильтровальных материалов на целлюлозной основе; созданы новые волокнистые пористые среды, используемые в бумажных фильтрующих элементах с тонкостью фильтрации 3—40 мкм, что вполне удовлетворяет требованиям надежности и долговечности разнообразных машин и механизмов.

В настоящее время сведения о фильтровальных бумагах, картонах и фильтрующих элементах на их основе разбросаны по разным источникам и обобщение их является важным и необходимым. Предлагаемая книга является первой такой попыткой. Большое внимание в ней уделено вопросам загрязненности и оценки чистоты топлив и масел, сведениям о конструкции элементов и фильтровальных материалах. Рассмотрены вопросы расчета, проектирования и оптимизации фильтрующих элементов по гидравлическим показателям и ресурсу работы.

ГЛАВА I

НАЗНАЧЕНИЕ, СФЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И КОНСТРУКЦИИ ФИЛЬТРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ БУМАГИ И КАРТОНА

1.1. Загрязненность нефтяных топлив, масел и рабочих жидкостей гидравлических систем

Повышение чистоты нефтепродуктов является комплексной проблемой. Ее решение включает в себя круг вопросов, связанных с очисткой нефтепродуктов при хранении, транспортировке, заправке и непосредственно на различных видах техники, использующих нефтяные топлива, масла и специальные жидкости.

Загрязнения в нефтепродуктах, образующиеся при изменении их углеводородного состава и заносимые извне, можно разделить на технологические — попадающие из исходной нефти или образующиеся в процессе производства, и эксплуатационные — попадающие в нефтепродукты при транспортировке, хранении и заправке.

Вопросы очистки топлив и масел от технологических загрязнений на нефтеперерабатывающих заводах рассмотрены в работах [11, 12]. Загрязнения в топливах и маслах весьма разнообразны по химическому составу (рис. 1.1) [13]. Минеральные загрязнения имеют атмосферное и коррозионное происхождение или являются продуктами износа металлов. Вода попадает в нефтепродукты из атмосферы. В результате окисления углеводородов образуются адсорбционные смолы и соли карбоновых кислот. При этом происходит окисление и уплотнение содержащихся в нефтепродуктах азотистых и сернистых соединений. При понижении температуры топлив вода и парафины кристаллизуются. Микробиологические загрязнения в виде бактерий и грибов, попадая из воздуха в нефтепродукты и разлагая их, вырабатывают продукты жизнедеятельности — пирогенные вещества.

Средний весовой баланс загрязнений топлив и масел в различных условиях показан на рис. 1.2 [13]. Из приведенных данных видно, что наиболее высокую чи-

стоту имеет реактивное топливо, которое до заправки в баки самолетов подвергается трехступенчатой фильтрации. Наибольшая загрязненность топлив имеет место в автотранспортных предприятиях, где применяется отстаивание или фильтрация с тонкостью 100 мкм через фильтр грубой очистки топливораздаточной колонки. Наряду с количеством загрязнений в нефтепродуктах важное значение для оценки их воздействия на детали двигателей имеет дисперсный состав.

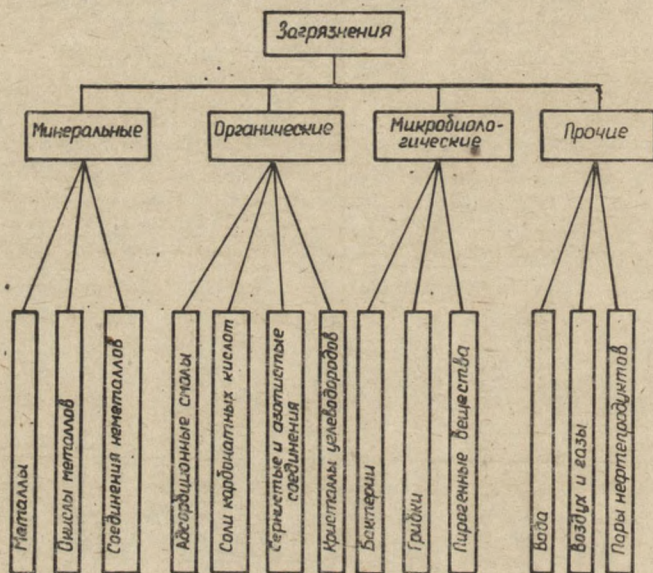


Рис. 1.1. Классификация загрязнений топлив и масел

Загрязнение дизельных топлив и бензинов. Топливо, поставляемое нефтеперерабатывающими заводами, всегда содержит некоторое количество загрязнений, являющихся продуктами технологической переработки нефти [14]. В дальнейшем в топливе непрерывно накапливаются загрязнения как органического, так и неорганического происхождения.

По данным А. И. Селиванова [15], дизельное топливо, выдаваемое нефтебазам для заправки сельхозтехники, содержит 0,01—0,12% загрязнений. А. И. Руденко и К. В. Рыбаков [16] отмечают, что содержание загрязнений в дизельном топливе в условиях сельского хозяй-

ства составляет 0,0005—0,063% по массе частиц размером 1—500 мкм. В работе [17] приводятся данные, характеризующие загрязненность дизельных топлив в железнодорожных цистернах и при приемке на нефтебазы. Данные Московской области приведены в табл. 1.1. В. В. Кондратов [18] приводит данные, характеризующие загрязненность дизельных топлив в автоцистернах на автозаправочных станциях (АЗС) (табл. 1.2.).

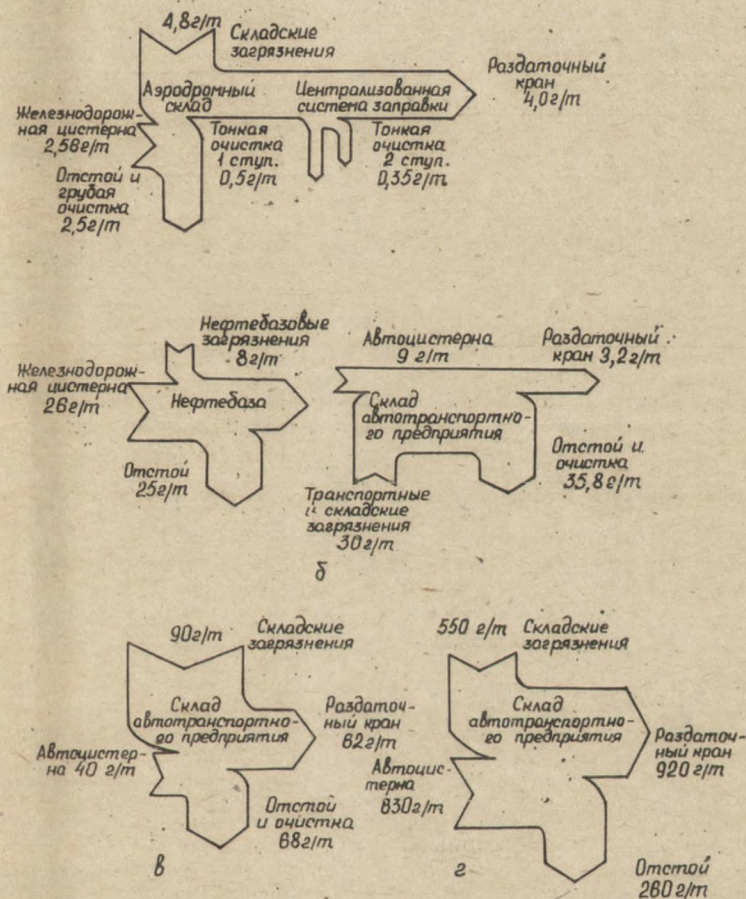


Рис. 1.2. Загрязненность топлив и масел в средней климатической зоне летом: а — реактивное топливо; б — автобензин; в — дизельное топливо, г — автотракторное масло

Таблица 1.1

Загрязненность проб дизельного топлива на нефтебазах
Московской области

Весовая кон- центрация мех. примесей, %	Количество частиц (шт./см ³) по интервалам размеров, мкм								Общее число частиц, шт.
	1—3	3—5	5—10	10—15	15—20	20—30	30—40	40—50	
0,0020	4700	2375	892	465	232	18	отс.	отс.	7682
0,0035	4040	2560	908	520	316	40	18	18	8410
0,0043	8100	4030	1050	680	360	30	10	10	14220

Содержание загрязняющих примесей в дизельном топливе

Место отбора пробы	Характе- ристика пробы	Содержа- ние мех. примесей	Количество	
			1—5	5—10
Автоцистерна (перед сливом)	Средняя	0,0012	6760— 19400	366— 693
Раздаточная колонка (перед сливом)	Из пистоле- та	0,008— 0,016	1250— —8240	330— —558
Раздаточная колонка (через 10 мин после слива)	Из пистоле- та	0,012— —0,02	3680— —8500	314— —521

Значительное количество загрязнений попадает в топливо при перевозке его автотранспортом с нефтебаз до расходных складов и АЗС. Особенно загрязняется дизельное топливо при транспортировании с нефтебаз и хранении в тракторных бригадах [18] (табл. 1.3.). В некоторых случаях загрязненность дизельных топлив в сельском хозяйстве достигает 630 г/т при размере частиц до 500 мкм.

При хранении топлив в резервуарах суммарное количество загрязнений растет. Основными факторами,

влияющими на загрязненность, являются условия и продолжительность хранения, запыленность и увлажненность окружающей среды, интенсивность коррозии резервуаров и складского оборудования, а также стабильность топлив. Так, по данным Я. Б. Черткова [1], дизельное топливо, отпускаемое с нефтебаз ГНС, содержит загрязнений от 10 до 28,6 г/т, а по данным А. И. Селиванова [15], загрязненность может достигать 100—120 г/т.

При длительном хранении дизельных топлив, особенно содержащих крекинг-компоненты, образуются осадки, состоящие из минеральных примесей, продуктов коррозии железа, нерастворимых смол и стойких эмульсий, содержащих воду. Появление таких осадков связано с окислением кислородом воздуха нестабиль-

Таблица 1.2

на автозаправочных станциях

частиц (шт./см ³) по интервалам размеров, мкм									
10—15	15—20	20—25	25—30	30—35	35—40	40—45	45—50	50—60	60—70
183— 192	37— 64	27— 37	18— 64	9— 18	9— 27	0—18	18	6—9	Отс.
143— —192	73— —95	55— —214	15— 55	15— 37	18— 29	9—15	9—18	9—15	7—9
42— —110	24— —73	30— —37	6— 22	6— 15	0— 29	6—22	6—7	0—7	Отс.

Таблица 1.3

Загрязненность дизельных топлив при различных условиях хранения, г/т

Местонахождение	База Глав- нефтеснабжения	Централь- ная база совхоза	Трактор- ная бригада
г. Владимир	28,6	30,2	82,5
Алтай	10	28	57
Южная климатическая зона	22,7	33,6	85,6

ных компонентов топлива. Попадание этих осадков в топливные системы вызывает серьезные нарушения в их работе. Вместе с тем при хранении топлив в резервуарах в результате отстоя происходит выпадение на дно значительной доли загрязнений и при отпуске топлива содержание в нем загрязнений уменьшается.

В автомобильных бензинах, отпускаемых с нефтебаз, содержится загрязнений до 9 г/т, размер частиц менее 60 мкм, а число их в 1 мл бензина достигает 13000 шт. [1]. В среднем на каждые 100 т бензина в резервуаре выпадает до 3,9 кг осадка, что вызывает необходимость регулярной очистки резервуаров.

Таблица 1.4

Загрязненность автомобильных бензинов на пути
железнодорожная цистерна — АЗС

Место отбора пробы	Количество загрязнений, % (по массе)	
	Средняя величина	Максимальная
Железнодорожная цистерна	0,0026	0,005
Цистерна нефтебазы	0,0009	0,0011
Кран автоцистерны	0,0008	0,0012
Раздаточный пистолет АЗС	0,00063	0,00106

Характеристика загрязненности автомобильных бензинов на пути их прохождения от железнодорожных цистерн до раздаточных пистолетов АЗС представлена в табл. 1.4. [17]. Наибольшей загрязненностью (до 0,005% по массе) характеризуются бензины, пробы которых были отобраны из железнодорожных цистерн. Максимальный размер загрязняющих частиц в этих бензинах достигал 70 мкм.

При транспортировании автобензинов с нефтебаз на АЗС применяются в основном автоцистерны. Бензин из автоцистерны имеет несколько большую загрязненность (0,00125), чем бензин из резервуаров АЗС. В резервуарах АЗС вследствие отстоя происходит снижение количества загрязнений в бензинах до 0,0006%. По данным [17], количество примесей в бензине в системе питания автомобилей в 2,2+5 раз больше, чем в резервуарах АЗС (табл. 1.5).

Загрязняющие примеси состоят из неорганической (зольной) части (70—94%) и органической (6—30%) [20]. В табл. 1.6 приведен химический состав загрязняющих примесей. Чем больше запыленность воздуха, где эксплуатируются машины, тем больше в загрязняющих

Таблица 1.5

Загрязненность автомобильных бензинов в г. Москве
на АЗС и в баках автомобилей

АЗС и бак автомобиля	Время эксплуатации	Содержание загряз- няющих примесей в бензине, г/т
АЗС	Лето	3,2
	Зима	2,6
«Волга»	Лето	7,4
	Зима	5,6
ЗИЛ-130	Лето	11,2
	Зима	7,8
ЗИЛ-585	Лето	16,3
	Зима	9,5

Таблица 1.6

Характеристика химического состава загрязняющих примесей
автомобильного бензина

Показатели	На АЗС	В баках автомобилей	
	Москва	Москва	Голодная степь
Зольность, %	61,8	70,7—89,8	92,2—94,4
Элементарный сос- тав зольной час- ти, %:			
Железо	17,5	26,5—29,0	35,8—48,4
Кремний	2,45	11,92—12,62	22,2—36,1
Алюминий	0,25	4,2—5,65	13,3—17,2
Кальций	0,29	3,8—7,0	4,0—8,1
Магний	0,06	4,12—6,04	2,9—3,5
Свинец	0,40	0,66—1,60	2,3—9,4
Натрий	0,05	0,8—1,0	0,6—1,6
Цинк	0,15	1,6—1,9	0,4—1,6
Медь	0,95	1,1—1,5	0,06—5,6

примесях бензина неорганических продуктов и особенно окислов кремния и алюминия. Твердость окиси кремния по 10-балльной шкале достигает 9 баллов, а окиси алюминия — 7 баллов, поэтому частицы окиси кремния более опасны при попадании в трущиеся пары двигателя.

Загрязненность и обводненность реактивных топлив. Развитие реактивной авиационной техники резко повысило требования к чистоте топлив, от которой зависит безопасность полетов и долговечность авиационной техники.

Прецизионные пары топливно-регулирующей аппаратуры большинства современных реактивных самолетов имеют зазоры 5—8 мкм. Наличие в топливе механических частиц даже меньшего размера может вывести их из строя. Вода вызывает обмерзание самолетных фильтров, трубопроводов, топливорегулирующей и топливоизмерительной аппаратуры, способствует более интенсивному загрязнению топлива механическими примесями и микроорганизмами, вызывает коррозию топливной системы самолетов.

Согласно коммерческим спецификациям крупных зарубежных авиакомпаний топливо, поступающее в баки реактивных самолетов, считается чистым, если в нем содержится не более 0,0015 (по массе) свободной воды и 0,023—0,23 мг/л механических примесей при размере частиц не более 5 мкм.

Загрязнение реактивных топлив начинается уже на нефтеперерабатывающих заводах. По данным работ [1, 3], в товарных резервуарах НПЗ топливо ТС-1 уже содержит до 4 г/т различных загрязнений. Эти загрязнения состоят из продуктов коррозии (железо) и минеральных частиц (соединения кремния, кальция, алюминия). Гранулометрический состав загрязнений показан в табл. 1.7.

Таблица 1.7

**Гранулометрический состав загрязнений топлива ТС-1
в товарных резервуарах НПЗ**

Число частиц (шт./1 см ³) в интервале размеров, мкм					
1—3	3—5	5—10	10—15	15—20	20—30
3820	260	180	86	24	Отс.

Топливо ТС-1 в заводских условиях фильтруется четырехкратно через фильтры с тканью фильтродиагональ. На стационарных складах ГСМ для очистки реактивных топлив от загрязнений применена двойная и тройная фильтрация. В условиях тройной фильтрации на складах ГСМ аэродромов в южной климатической зоне в средних пробах топлива Т-1 из резервуаров загрязненность колеблется от 1,23 до 5,5 г/т с максимальным размером частиц 20—30 мкм. В самолет заправляется топливо Т-1 при помощи централизованных заправщиков при загрязненности 1,77—7,3 г/т с максимальным размером частиц 15—20 мкм (табл. 1.8.).

Вода является постоянным спутником топлив и в зависимости от физического состояния может находиться в двух формах: растворенной и свободной. Растворенная вода представляет собой фазу сверхмелких частиц, которые можно увидеть лишь при охлаждении топлив. Свободная вода — это вода, находящаяся в топливе в виде отдельной фазы:

- эмульсии молочнообразного цвета;
- отдельных капель, осаждающихся в топливе;
- тонких светлых пылевидных частиц;
- заметных скоплений в форме лужиц.

Обычно считают, что минимальное количество свободной воды, которое различает человеческий глаз в топливе, составляет приблизительно 30 мг/л. Наибольшую трудность при отделении воды от топлива представляют микрокапли воды, находящиеся в топливе во взвешенном состоянии (эмульсии), в то время как устойчивая вода легко может быть удалена из топлива сливом.

Наибольшая опасность образования эмульсии существует в системах, где применяются быстроходные центробежные насосы большой мощности, а также в трубопроводах, в которых может возникнуть большая турбулентность в топливном потоке. Установлено, что размеры капель воды в таких эмульсиях не превышают 35 мкм. Наиболее широко встречающийся тип эмульсий — это эмульсии, образованные конденсационным путем при изменении внешних условий (температура, давление, влажность и т. д.).

Обследование обводненности топлив ТС-1, Т-1 и Т-7 на складах ГСМ 15 аэропортов северной, средней и южной климатических зон (табл. 1.9) показало, что общее

Таблица 1.8

Характеристика загрязнений топлив Т-1 и ТС-1 на стационарных складах ГСМ аэродромов при тройной фильтрации

Показатель	Т-1				ТС-1			
	Резервуар		Центральный заправщик		Резервуар		Топливозаправщик	
			Резервуар	Колонка			Раздаточный кран	Отстой
	2	3	4	5	6	7	8	
Количество загрязнений, г/г	1,23—4,4	3,8—5,5	1,77—7,3	1,04—1,11	3,9—14,6	0,5—0,99	2,0—3,0	
Влажность, %	7,12—10,2	4,78—7,34	2,46—23,73	14,5—22,6	19,0—57,0	9,4—33,0	7,7—43,0	
Зольность, %	66,77—80,61	67,39—83,68	47,65—77,18	47,8—66,6	74,0—79,5	59,0—78,57	73,0—78,57	
Количество частиц (шт./см ³) размером, мк:								
1—3	946—1218	3090	2035—2280	2540—8700	—	390—1610	1070—1535	
3—5	314—510	1290	536—950	1070—1890	—	214—785	360—731	
5—10	50—232	465	72—296	500—820	—	72—214	250—286	
10—15	9—90	130	20—55	107—376	—	36—72	18—153	
15—20	Отс. ₄₃	55	Отс. ₂₀	67—286	—	Отс. ₅₃	18—107	
20—30	Отс. ₁₈	20	Отс.	11—107	—	Отс. ₃₆	Отс. ₃₆	
30—40	Отс. ₀	Отс.	»	11—36	—	Отс.	Отс. ₁₈	

1	2	3	4	5	6	7	8
Элементы, %:							
Углерод	—	—	24,67—29,06	12,92—25,45	7,42	—	—12,92
Водород	—	—	6,46—12,66	7,52—10,18	3,02	—	—7,52
Сера	—	—	0,05—0,39	0,1—0,67	0,34	—	—0,1

содержание воды в средних пробах из резервуаров и из раздаточных кранов топливозаправщиков достигает наибольшего количества в осенний период [21]. Размеры водных капель в таких эмульсиях находятся в основном в интервале от 2 до 9 мкм, но встречаются микрокапли диаметром 0,6—0,7 мкм и даже меньше. Стабильные эмульсии образуются также под воздействием противоположных электрических зарядов, возникающих, например, при трении топлива о различные среды. Такого вида эмульсия образуется в нижних слоях железнодорожных цистерн.

Таблица 1.9

Обводненность топлив ТС-1, Т-1, Т-7 на складах ГСМ аэропортов

Период года	Общее содержание воды, % *	
	Резервуар. Средняя проба	Топливозаправ- щик, раздаточный кран
Зима	0,0011—0,0090	0,0012—0,0076
Весна	0,0021—0,0090	0,001 —0,0088
Осень	0,0031—0,010	0,0025—0,0097
Лето	0,0022—0,0077	0,0019—0,0098

* Содержание растворенной воды за этот же период колебалось от 0,002 до 0,007 %.

Перечисленные выше водоотливные эмульсии, как правило, стабильны. Стабильность эмульсий повышается при попадании в топливо поверхностно-активных веществ (ПАВ) — смол, нафтеновых кислот и др.

На НПЗ топливо обезвоживается, но на пути к топливным бакам оно обводняется снова. При этом причины и источники обводнения самые различные. Одним из основных источников обводнения топлив является воздух, с которым контактирует топливо. Между водой, растворенной в топливе, и влажностью воздуха существует динамическое равновесие, наступающее, как правило, достаточно быстро. Так, в горизонтальном резервуаре, заполненном на $\frac{3}{4}$ объема и снабженном двухдюймовым дыхательным клапаном, такое равновесие может наступить через минуту.

Установлено (табл. 1.10), что в 1 м³ воздуха при различных температурах может содержаться до 17,3 г воды. При охлаждении 1 м³ воздуха от 20 до 0°С может

выделиться в топливо 12,5 г воды. При резком потеплении и одновременном повышении абсолютной влажности воздуха создаются условия для конденсации водяных паров из воздуха в топливо, а при резком охлаждении топлива вода не успевает перейти в воздух и выделяется в топливо в виде микрокапель или кристаллов льда (при минусовых температурах).

Таблица 1.10

Содержание воды в воздухе при различных температурах

Температура воздуха, °С	0	5	10	15	20
Содержание воды, г/м ³	4,8	6,7	9,4	12,8	17,3

Топливо, хранящееся в резервуарах, снабженных дыхательными клапанами, обводняется за счет конденсации воды из воздуха, возникающей при ночном понижении температуры, с последующим осаждением на дно резервуара с образованием «водяной подушки». При хранении топлива в малой таре и железнодорожных цистернах оно обводняется за счет растворенной воды при понижении температуры.

Обводнение топлива может произойти также за счет грунтовых вод, проникающих в топливо через неплотности в стенках резервуаров и труб, проложенных в грунте.

Для нормальной работы двигателей внутреннего сгорания и реактивных двигателей необходимо топливо, не содержащее воды или содержащее ее в ничтожных количествах. Для отделения воды от топлив в начале 50-х годов в США стали использоваться фильтры-сепараторы. В настоящее время фильтры-сепараторы различного типа широко применяются в аэропортах для очистки и обезвоживания реактивных топлив.

Загрязненность нефтяных масел и рабочих жидкостей гидравлических систем. В отечественной и зарубежной литературе детально изучен вопрос о загрязненности моторных масел в системах смазки двигателей и о влиянии загрязненности на износ деталей кривошипно-шатунной группы, а вопрос о загрязненности моторных масел в процессе хранения и транспортировки почти не исследован.



Содержание и гранулометрический состав загрязнений
в дизельных маслах в сельской местности

Марка масла	Место отбора пробы	Содер- жание загряз- нений, % (по массе)	Среднее число частиц (тыс. шт./см ³) по интервалам размеров, мкм							
			1—5	5—10	10—15	15—20	20—30	30—40	40—50	50
ДС-11	Железнодорожная цистерна	0,010	15,8	8,4	3,9	2,1	1,1	0,3	0,2	0,07
ДС-11	Резервуар склада	0,014	17,5	12,3	2,0	1,0	0,8	0,2	0,02	0,005
ДС-8	То же	0,110	863,7	97,2	30,1	13,9	7,5	0,97	0,8	1,15
ДС-11	Бочка	0,120	974,5	849,2	245,0	74,2	16,3	4,1	1,7	2,9

С. В. Венцель принимает начальную загрязненность заправленного в картер двигателя масла за нулевую [22].

По данным М. А. Григорьева, дизельные масла, применяемые при эксплуатации сельхозтехники, могут содержать до 1,4% (по массе) загрязнений, а автотракторные — до 0,28% (по массе) [2].

Дизельные масла, перевозимые в железнодорожных цистернах, содержат загрязнения в количестве 150—200 г/т [23], при заправке их в двигатели внутреннего сгорания — $0,12 \pm 0,23\%$ (по массе).

Для оценки воздействия загрязнений на износ двигателей необходимо знать их гранулометрический и химический состав. В маслах ДС-11 и ДС-8, поступающих на склады ГСМ колхозов и совхозов, содержатся частицы загрязнений размером более 50 мкм с концентрацией свыше 1000 шт. в 1 см³ (табл. 1.11). Значительное содержание в загрязнениях соединений кремния и алюминия (табл. 1.12) говорит о высоких абразивных свойствах частиц загрязнений.

В. П. Коваленко [7] исследована загрязненность масел в разных климатических зонах нашей страны. Полученные данные обобщены в табл. 1.13, из которой видно, что в южной климатической зоне наибольшее количество загрязнений попадает в картер двигателя при заправке.

Анализ отказов и нарушений работы гидросистемы показывает, что более 10% их происходит вследствие недопустимого загрязнения рабочей жидкости [24, 25]. Проведенные исследования показали, что в жидкости гидравлических систем, несмотря на наличие фильтров, находится большое число неотфильтрованных частиц, достигающее нескольких тысяч штук в 1 см³ жидкости. Основная масса частиц загрязнений при работе систем находится во взвешенном состоянии и движется с рабочей жидкостью. Попадая в зазоры между рабочими поверхностями трущихся пар агрегатов, твердые частицы вызывают увеличение сил трения, а в некоторых случаях и заклинивание деталей. Характеристика типов неисправностей, вызванных загрязнениями, дана в табл. 1.14.

Частицами загрязнений считаются все посторонние частицы, включая смолообразные органические, колонии бактерий и продукты их жизнедеятельности (ГОСТ 17216-71). Загрязнения в рабочую жидкость гидросис-

Таблица 1.12
Характеристика зольной части загрязнений в автомобильных
и дизельных маслах в сельской местности [16]

Марка масла	Место отбора пробы	Содержан. загрязне- ний, % (по массе)	Содержание 10 ⁻⁴ %				
			Fe	Cu	Pb	Al	Si
ДС-11	Резервуар склада	0,137	Следы	0,2—0,4	0,04	Следы—0,45	1,5—2,0
АКп-10	То же	0,080	—	0,12	—	0,5	2,3
ДС-11	Автоцистерна	0,100	—	0,7—	—	Следы	1,7
ДС-11	Бочка	0,115	Следы	0,25	0,02	0,12	1,4—2,2
АКп-10	То же	0,124	Следы	0,17	—	0,32	1,4—2,5
ДС-11	Раздаточный кран	0,103	—	0,1—0,2	—	0,13—0,3	2,4

Т а б л и ц а 1.13

Содержание и granulометрический состав загрязнений
в моторных маслах

Марка масла	Место отбора пробы	Содержа- ние загряз- нений, % (по массе)	Среднее число частиц (тыс. шт./см³) по интервалам размеров, мкм						
			1—5	5—10	10—20	20—30	30—40	40—50	>50
Северная климатическая зона									
АС-8	Автоцистерны	0,051	8185,0	60,0	10,4	7,4	4,1	2,4	0,013
АС-8	Резервуар склада	0,095	4675,0	213,0	70,6	17,0	6,7	6,1	4,0
АС-8	Раздаточный кран	0,089	4343,2	60,5	130,5	62,1	19,7	2,4	3,1
Средняя климатическая зона									
ДС-8, ДС-11	Автоцистерны	0,057	3635,0	121,1	17,5	2,8	1,5	—	—
ДС-8, ДС-11	Резервуар склада	0,105	4674,2	298,5	102,1	5,2	6,5	—	1,6
ДС-8, ДС-11	Раздаточный кран	0,090	6351,0	157,3	71,2	6,8	6,7	1,5	2,5
АС-8	Автоцистерны	0,063	9110,0	43,3	69,1	8,5	6,6	1,4	0,95
АС-8	Резервуар склада	0,118	3451,0	227,0	83,6	57,7	36,8	18,2	2,9
АС-8	Раздаточный кран	0,920	1523,7	257,7	85,2	22,3	6,3	3,6	1,5
Южная климатическая зона									
АС-8	Автоцистерны	0,069	1320	50,0	103,8	72,9	15,4	3,9	3,8
АС-8	Резервуар склада	0,129	5050,0	37,5	98,1	30,3	23,2	1,9	0,2
АС-8	Раздаточный кран	0,093	128,0	108,0	305,2	21,5	4,6	—	—

тем могут проникать из многих источников, например при транспортировании в результате повышенной коррозии внутренних поверхностей цистерн и неудовлетворительной их очистки на пунктах налива и слива с открытыми люками, а также при недостаточной герметизации люков цистерн с жидкостью. Во время хранения на нефтебазах рабочие жидкости загрязняются за счет «дыхания» резервуаров, связанных с перепадами температур днем и ночью, и за счет коррозии поверхностей резервуаров (табл. 1.15). Обследование условий хранения рабочих жидкостей на нефтебазах показало, что

Таблица 1.14

**Краткая характеристика типов неисправностей,
вызванных загрязнениями, в различных узлах гидросистемы**

Узлы гидросистемы	Типы неисправностей, вызванных загрязнением узлов гидросистем
Насосы	1. Эрозия сменных пластин 2. Заедание лопастей привода 3. Повышенный износ шеек и подшипников вала 4. Повышенный износ цистерн 5. Износ плунжера и втулок
Предохранительные клапаны	1. Стук и износ клапанов 2. Ложное срабатывание предохранительного клапана, колебания давления
Распределительные клапаны	1. Забивание отверстий, износ поясков и корпуса, избыточная утечка 2. Заедание золотника, что приводит к поломке электромагнита 3. Забитые загрязнители клапана вызывают чрезмерные ударные нагрузки, что приводит к повреждению шлангов, трубопроводов, фитингов и др. деталей
Обратные клапаны	1. Возможность обхода клапана вследствие отложений 2. Износ шарика и седла, что приводит к утечкам
Дроссели	1. Эрозия острых кромок, что влияет на точность дозирования 2. Забивка сопел 3. Образование лаковых отложений
Цилиндры	1. Интенсивный износ штоков цилиндров, уплотнений, внутренних поверхностей цилиндров и поршней 2. Неправильное функционирование демпферов

Таблица 1.15

Содержание и granulометрический состав загрязнений
в индустриальном масле ИС-20

Место отбора пробы	Содержа- ние загряз- нения, % (по массе)	Число частиц (тыс. шт./см³) по интервалам размеров, мкм				
		1—5	5—15	15—25	25—35	35—45
Автоцистерна Резервуар склада Система гидравли- ческого усилите- ля после заправ- ки	0,012	263	30,8	2,3	0,6	0,2
	0,075	1980	231,0	15,7	4,1	0,2
	0,071	1860	216,5	14,8	3,8	0,2

нарушение правил хранения приводит к значительным загрязнениям [10]. Результаты анализа проб масел, взятых из бочек, предназначенных для отправки потребителям, приведены в табл. 1.16.

При заливке во вновь изготовленную гидросистему даже предварительно очищенной жидкости происходит загрязнение за счет недостаточной чистоты баков, трубопроводов, клапанов, насосов двигателей и т. д. Частицы пыли, ржавчины, волокна, краски и т. п. так или иначе попадают в систему. При работе гидросистемы все эти загрязнения, а особенно продукты притирки (паста, карбиды бора, кремний, электрокорунд и т. д.), постепенно вымываются жидкостью и начинают вместе с ней циркулировать в гидросистеме, увеличивая износ трущихся поверхностей.

Таблица 1.16
Загрязнение рабочих жидкостей в условиях хранения
на нефтебазах

Масла	Количество проб	Механические загрязнения, %	Откуда брались пробы
АМГ-10	5	Отс.	Запаянные емкости железнодорожных цистерн
Индустриальное			
ИС-30	2	Отс.	То же
ИС-45	3	0,005 — 0,0064	— » —
ВНИИНП-401	2	0,0072 — 0,025	Бочки
Веретенное АУ	1	Отс.	Железнодорожные цистерны

В табл. 1.17 приведены результаты анализов проб масел, отобранных из новых гидросистем [10]. Особенно велика загрязненность рабочих жидкостей для гидросистем машин, работающих в тяжелых условиях. Примером могут служить горные угледобывающие машины. Масла, применяемые в качестве рабочей жидкости для гидравлических систем горных машин, содержат много загрязнений из частиц угля и породы (табл. 1.18). Загрязняющие вещества в процессе эксплуатации выделяются также из самой жидкости в виде частиц красителя, ингибиторов, присадок, продуктов окисления компонентов жидкости. Жидкость и гидравличес-

кие системы могут загрязняться частицами пыли из воздуха. Пыль поступает в баки через систему наддува и дренажа, заливные горловины, в гидросистему — через штоки силовых цилиндров.

Непрерывно в жидкость попадают продукты износа гидроагрегатов и, особенно, насосов и двигателей. Так, например, результаты обмера аксиально-поршневых насосов НП-25, отработавших межремонтный ресурс (около 2000 ч), показали, что вследствие износа деталей зазоры между поршнями и цилиндрами увеличились в среднем на 10—15 мкм.

Таблица 1.17

Загрязненность рабочей жидкости (ИС-20) гидросистем
нового оборудования на испытательных стендах

Станок, оборудование	Число проверен- ных гидро- систем	Содержа- ние меха- нич. при- месей, %	Гранулометрический состав, % для частиц размером, мкм			
			до 10	20—30	30—50	свыше 50
Крупношлифо- вальный	19	0,013— —0,230	70—80	20—25	Остальное	
Торцекруглошли- фовальный	5	0,046— —0,090				
Заправочные колонки	4	0,012— —0,020	70—80	20—25		

В связи со значительным влиянием загрязненности жидкости на надежность техники необходимо вести постоянный контроль за ее чистотой и разрабатывать методы для защиты агрегатов от вредного влияния загрязнений. Однако необходимо помнить, что получить абсолютно чистую жидкость невозможно, так как по мере уменьшения размера частиц возрастает их число, а вместе с тем увеличивается стоимость их удаления.

За рубежом существует ряд стандартов, в которых предусмотрены требования к чистоте масел. Например, в США существуют классы чистоты по спецификации MiL T=2565—68—61 (табл. 1.19). В работе [10] приводятся американские стандарты SAE, ASTM, AIA, которыми установлено 10 классов загрязненности жидкости, характеризующихся размерами частиц 5—10, 10—25, 25—50, 50—100 и свыше 100 мкм. Один класс жидкости

отличается от другого числом частиц указанных размеров.

В Советском Союзе введен ГОСТ 17216-71, по которому все рабочие жидкости, в том числе и нефтяные масла, применяемые в промышленности, на транспорте и других отраслях народного хозяйства, подразделяют-

Таблица 1.18

Содержание и гранулометрический состав загрязнений
в рабочих жидкостях для гидравлических систем горных машин

Место отбора пробы	Содер- жание загряз- нений, % (по массе)	Число частиц (тыс. шт./см ³) по интервалам размеров, мкм		
		25—50	50—75	75—100
Редуктор конвейе- ра	0,1917	9150	—	270
То же	0,0415	3190	—	—
Редуктор режущей части комбайна	0,058	5490	—	32
Ванна подающей части комбайна	0,0937	2510	—	12,5
Редуктор электро- воза	0,0414	Не определялось		

Таблица 1.19

Классы чистоты рабочих жидкостей для гидравлических систем
по спецификации MIL T-2565-68-61

Класс	Допустимое число частиц (шт./100 см ³) в интервале размеров, мкм				
	50	10—25	25—50	50—100	100
0	2700	670	93	16	1
1	4600	1340	210	28	3
2	9700	2680	380	56	5
3	24000	5360	780	110	11
4	32000	10800	1510	225	21
5	87000	21400	3130	430	41
6	128000	42000	6500	1000	92

ся в зависимости от количества и размеров содержащихся в них загрязнений на 19 классов. Число частиц загрязнений в каждом интервале размеров и их суммарное количество для жидкости соответствующего класса чистоты не должно превышать значений, приведенных в табл. 1.20.

1.2. Способы оценки загрязненности топлив и масел

Традиционным методом оценки загрязненности жидкости является фильтровально-микроскопический. Метод заключается в подсчете по размерным интервалам количества частиц, осевших на поверхности нитроцеллюлозного (бумажного) фильтра или на дне кюветы. Методика подсчета частиц в дизельном топливе с помощью микроскопа изложена в ГОСТе 14146-79. Эта методика может быть использована и при подсчете частиц загрязнений в светлых маслах.

При подсчете частиц загрязнений непосредственно в поле зрения микроскопа существует субъективная погрешность вследствие возможного пропуска или повторного счета частиц, так как подсчитываются лишь частицы, попавшие в определенное число полей зрения с последующей обработкой результатов методом математической статистики.

Метод подсчета трудоемок, дает значительные погрешности, обусловленные субъективностью оценки размеров и количества частиц различными операторами, а также внесением значительного количества посторонних (особенно крупных) частиц при отборе и консервации проб. В производственных условиях это приводит к ухудшению результатов контроля на 2—4 класса по сравнению с фактической чистотой жидкости.

В настоящее время за рубежом и у нас в стране разработаны автоматические счетчики частиц, значительно ускоряющие процесс подсчета частиц и позволяющие получать стабильные результаты. Одним из таких приборов является счетчик Культера (модель ТА-II), выпускаемый французской фирмой «Культроникс» [28]. Это 16-канальный анализатор для анализа по размерам от 0,4 до нескольких сот микрометров. Блок-схема анализатора представлена на рис. 1.3.

«Культроникс» обеспечивает анализ образца и дает результаты на самописце по полному распределению

Таблица 1.20
Требования к чистоте рабочих жидкостей по классам в соответствии с ГОСТом 17216-71

Класс	Количество частиц загрязнений в 100 см ³ не более при размере частиц, мкм										Масса *загрязнений, % не более
	от 0,5 до 1	св. 1 до 2	св. 2 до 5	св. 5 до 10	св. 10 до 25	св. 25 до 50	св. 50 до 100	св. 100 до 200	Волокна		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
00	800	400	32	8	4	1	Отс.	А. о.	А. о.	—	
0	1600	800	63	16	8	2	То же	Отс.	А. о.	—	
1	—	1600	125	32	16	3	—»—	То же	Отс.	—	
2	—	—	250	63	32	4	1	—»—	—»—	—	
3	—	—	—	125	63	8	2	—»—	—»—	—	
4	—	—	—	250	125	12	3	—»—	—»—	—	
5	—	—	—	500	250	25	4	1	—»—	—	
6	—	—	—	1000	500	50	6	2	1	0,0002	
7	—	—	—	2000	1000	100	12	4	2	0,0002	
8	—	—	—	4000	2000	200	25	6	3	0,0004	
9	—	—	—	8000	4000	400	50	12	4	0,0006	
10	—	—	—	16000	8000	800	100	25	5	0,0008	
11	—	—	—	31500	16000	1600	200	50	10	0,0016	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
12	—	—	—	63000	31500	3150	400	100	20	0,0032
13	—	—	—	—	63000	6300	800	200	40	0,005
14	—	—	—	—	125000	12500	1600	400	80	0,008
15	—	—	—	—	—	25000	3150	800	160	0,016
16	—	—	—	—	—	50000	6300	1600	315	0,032
17	—	—	—	—	—	—	12500	3150	630	0,063

Примечания: 1. «Отсутствие» означает, что при взятии одной пробы жидкости частицы заданного размера не обнаружены или при взятии нескольких проб общее число обнаруженных частиц меньше числа взятых проб. 2. А. о. — абсолютное отсутствие частиц загрязнений.

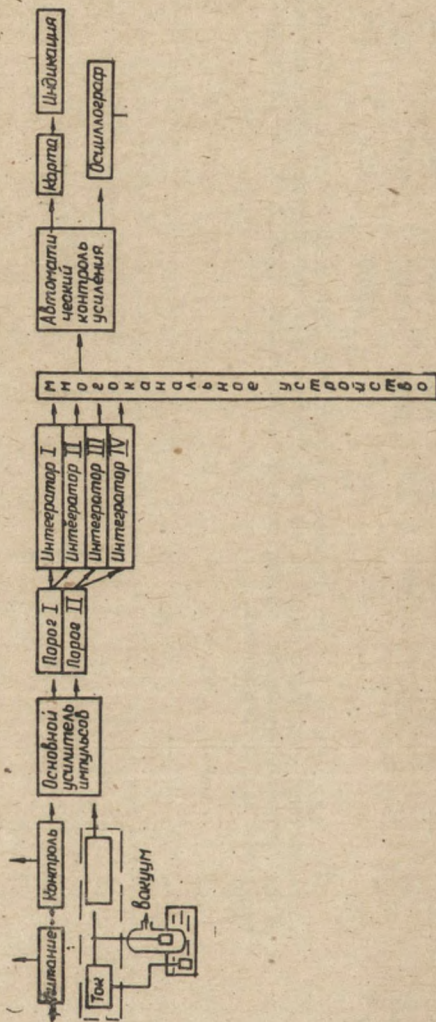


Рис. 1.3. Блок-схема автоматического анализатора («Кульtronикс»)

частиц по размерам за каждые 20 с и имеет вывод на осциллограф.

Модель ТА-II располагает двумя типами устройств по обработке результатов — ручным и автоматическим. При автоматической обработке результатов полное распределение в выбранной системе регистрируется на самописце или записывается с помощью печатающего устройства.

Фирма «Hiac Instruments Devision» (США) производит приборы «Hiac», которые классифицируют взвешенные в жидкости частицы по величине и количеству [31]. В процессе измерения исследуемая жидкость может находиться в сосуде или работающей гидросистеме. Количество фракций может быть от 1 до 6, при необходимости — до 12. Частицы измеряются точно и независимо от их природы, размера или цвета. Приборы считают около 4000 шт. частиц в секунду и могут определять количество частиц в заданном объеме жидкости или их распределение по фракциям.

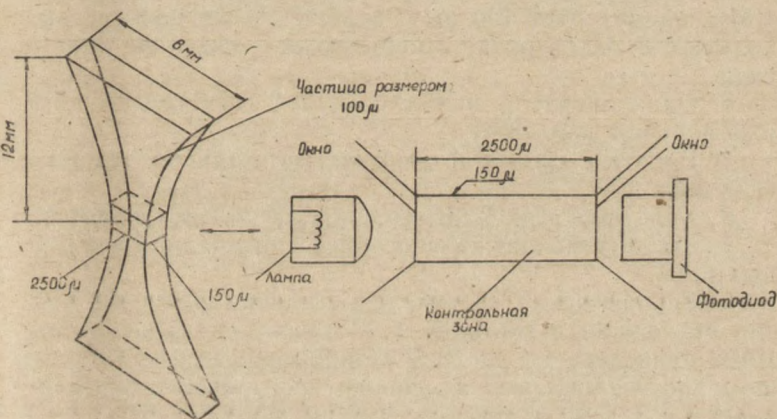


Рис. 1.4. Схема измерения частиц прибором «Hiac»

Принцип действия приборов «Hiac» основан на блокировке светового потока. Выходной сигнал от фотодиода постоянно поддерживается светом, проходящим через контрольную зону (рис. 1.4). Частица, попадающая в эту зону, блокирует определенное количество света, пропорциональное ее размеру. Если не превышает рекомендуемая концентрация частиц (4000 шт./с), то на

десятикратный объем контрольной зоны приходится одна частица, таким образом, каждая частица измеряется индивидуально.

Американская фирма «Миллипор» производит автоматизированный микроскоп для подсчета частиц и определения их размеров [29]. Система «Миллипор» ТТМС сохраняет преимущества и устраняет недостатки ручного микроскопа.

Преимущества системы ТТМС:

1. Точный размер частиц определяется непосредственно.

2. Подсчет частиц и определение их размеров производится в течение 5 мин, при работе с ручным микроскопом эта операция занимала более 20 мин.

3. Отклонение от нормы уменьшается от ± 33 (при применении обычного микроскопа) до $\pm 2\%$.

4. Частицы по размерам распределяются автоматически.

5. Производственные затраты значительно сокращаются, так как оператор, управляющий системой ПМС, анализирует 100 проб в день, ту же работу выполняют 8 операторов, использующих обычный микроскоп.

6. Один оператор может работать с системой полный рабочий день (8 ч).

7. Работа с системой требует минимальных технических знаний.

8. Характеристика загрязнений легко определяется.

9. Систему можно приспособить для анализа единичных проб.

Технологическая система определения размеров частиц стандартным методом и с применением системы ПМС приведена на рис. 1.5. Прибор основан на небольшом рассеивании или изменении электрического сопротивления потока жидкости, содержащего твердые загрязняющие включения.

Для подготовки пробы определенное количество жидкости фильтруют через фильтр «Миллипор» с размером пор 0,8 мкм. Все частицы большего размера пор задерживаются на фильтрующей поверхности. Система ПМС подсчитывает частицы. Телевизионная камера передает изображение на компьютер, оттуда — на телеэкран. Оператор переключает систему, автоматически подсчитываются частицы больше установленных разме-

ров. Оператор переводит микроскоп на другой участок фильтра и операция повторяется.

В Советском Союзе выпускается анализатор механических примесей ФС-112. Прибор предназначен для автоматического подсчета в пробах различных жидких сред количества взвешенных частиц и их классификации по размерным группам, осуществляемой на основе критерия интенсивности светорассеяния регистрируе-

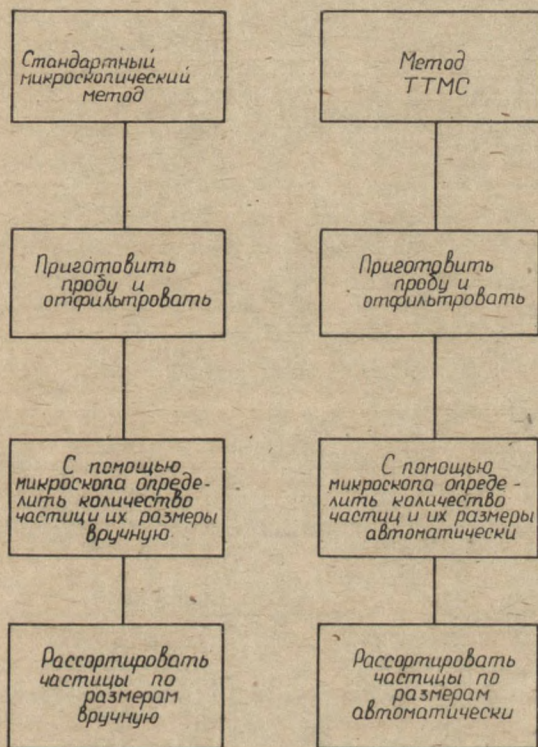


Рис. 1.5. Технологическая схема определения размера частиц стандартным методом и с применением системы TTMS

мых частиц. Анализатор кроме механических частиц, взвешенных в контролируемой среде, позволяет подсчитывать количество капелек применяемой эмульсионной жидкости. Анализатор может быть использован для кон-

троля загрязненности различных жидкостей (авиатоплива, масла, гидрожидкости, спирта и т. д.).

С 1979 года в Советском Союзе серийно выпускаются приборы для автоматического контроля чистоты жидкости ПКЖ-902. Они предназначены для измерения размеров и определения количества инородных частиц в маслах, топливах и моющих жидкостях [30]. Измерение размеров частиц производится с помощью фотоэлектронного датчика путем отнесения их к одному из пяти размерных диапазонов: 5—10, 10—25, 25—50, 50—100, свыше 100 мкм, что соответствует ГОСТу 17216-71.

Прибор ПКЖ-902 позволяет быстро, точно и эффективно производить автоматический гранулометрический анализ чистоты рабочих жидкостей как в непрерывном потоке (при отсутствии в жидкости газовых пузырей) в процессе работы стандов, так и в контрольных пробах при экспресс-анализе в лабораторных условиях. Прибор переносной, легко встраивается в гидросистемы и позволяет контролировать работу оборудования в различных помещениях или стационарно подсоединяется к контролируемой гидросистеме (рис. 1.6, 1.7).

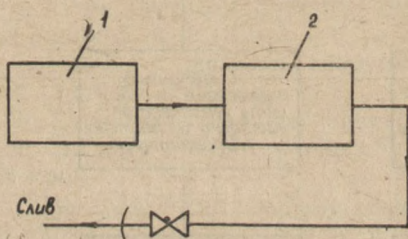


Рис. 1.6. Схема подключения прибора ПКЖ-902 при отсутствии в гидросистеме воздушных пузырей: 1 — контролируемая гидросистема; 2 — гидроблок прибора ПКЖ-902

Прибор ПКЖ-902 позволяет за 4 с получить информацию о чистоте жидкости в 100 см³, результаты анализа фиксируются на цифровом табло прибора. При необходимости можно контролировать значительно большие объемы жидкости (3—6 л за 2—4 мин) или осуществлять контроль, обеспечивающий наибольшую достоверность.

Контроль чистоты жидкости непосредственно из потока исключает строительство на заводах дорогостоящих особо чистых помещений для выполнения анализов. Он может быть произведен в любом производственном помещении, а также на открытых площадках, так

как загрязненность атмосферы не влияет на его показание.

При анализе в лабораторных условиях осуществляется контроль отдельных проб жидкости. При этом пробы жидкости объемом 100 см^3 заливаются в специальную воронку (рис. 1.8).

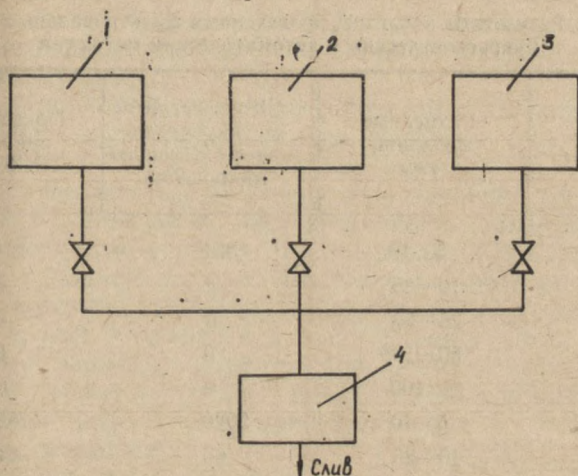
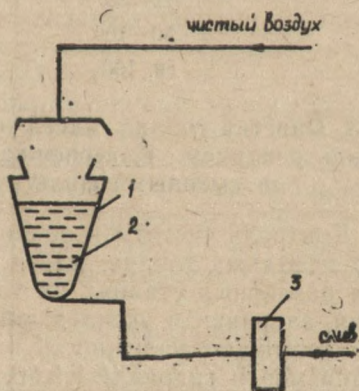


Рис. 1.7. Схема подключения прибора ПКЖ-902 для поочередного контроля группы близко расположенных стенов: 1, 2, 3 — контролируемые гидросистемы; 4 — гидроблок прибора ПКЖ-902

Рис. 1.8. Схема анализа отдельных проб жидкости: 1 — воронка; 2 — контролируемая проба; 3 — гидроблок прибора ПКЖ-902



Результаты испытаний выявляют высокую стабильность показаний приборов типа ПКЖ-902 и удовлетворительную сходимостъ (в пределах ошибок измерения) данных анализа, проведенного фильтровально-микроскопическим и автоматическим методами (табл. 1.21).

Таблица 1.21

Результаты анализов, проведенных фильтровально-микроскопическим и автоматическим методами

№ пробы	Размерные фракции, мкм	Количество частиц, определенное с помощью микроскопа	Показания прибора ПКЖ-902
1	5—10	351	434
	10—25	2	4
	25—50	0	0
	50—100	0	0
	св. 100	0	0
2	5—10	2028	1703
	10—25	66	61
	25—50	3	3
	50—100	2	1
	св. 100	0	0
3	5—10	201	154
	10—25	9	1
	25—50	2	0
	50—100	1	1
	св. 100	0	2

1.3. Очистка топлив, масел и гидравлических жидкостей фильтрованием. Классификация фильтров-очистителей со сменными фильтрующими элементами

Контроль чистоты и правильно организованная очистка нефтяных топлив, масел и специальных жидкостей на различных стадиях их транспортирования и хранения, заправки и эксплуатации различных видов техники повышают надежность и долговечность машин, механизмов и гидравлического оборудования. В то же время экономический ущерб от применения некондици-

онных по загрязненности горюче-смазочных материалов и жидкостей гидравлических систем, по мнению специалистов, составляет ежегодно многие сотни миллионов рублей.

Постоянно растущие требования к чистоте нефтяных топлив и масел активизируют усилия специалистов в области развития и совершенствования разнообразных средств и способов очистки. При этом особое внимание уделяется фильтрованию, как наиболее простому и эффективному способу [1—10].

Фильтрованием называют процессы разделения неоднородных систем при помощи пористых перегородок, которые задерживают одни фазы и пропускают другие [51]. К этим процессам относится разделение топливно-масляных суспензий на чистую жидкость и твердый осадок. К ним можно также отнести разделение водно-топливных и водно-масляных эмульсий на две жидкие фазы, из которых одна задерживается перегородкой (вода), а другая (топливо или масло) пропускается [3, 4].

Таким образом, фильтрование является процессом, который может с успехом применяться для отделения различных загрязнений, присутствующих в нефтяных топливах и маслах.

Разнообразный ассортимент применяемых топлив, масел и специальных жидкостей по физико-химическим свойствам, разнообразные области применения, а также существенные различия в требованиях к чистоте, связанные с условиями применения, обусловили многообразие конструкций фильтров, используемых для очистки топлив и масел от загрязнений. Несмотря на это, любой фильтр конструктивно включает корпус и один или несколько сменных фильтрующих элементов или пакетов различных конструкций.

Фильтры со сменными фильтрующими элементами по назначению можно разделить на 3 основные группы:

1. Стационарные фильтры, применяемые на нефтебазах, аэродромах, складах ГСМ, АЗС. Как правило, они характеризуются большой производительностью и имеют несколько фильтрующих элементов или пакетов, размещенных в одном корпусе. Тонкость фильтрации 20 мкм и выше.

2. Фильтры, устанавливаемые на передвижных средствах заправки. Они имеют меньшую производительность по сравнению со стационарными фильтрами и

меньшие размеры корпуса. Тонкость фильтрации в том же диапазоне, что и у стационарных фильтров.

3. Фильтры, устанавливаемые в системах машин и оборудования. Характеризуются широким диапазоном по тонкости фильтрации и производительности. Особенно большой производительностью отличаются фильтры, устанавливаемые в гидросистемах машин различного оборудования. Тонкость фильтрации от 0,5 до 200 мк. Обычно в корпусе фильтра устанавливаются один или два фильтрующих элемента. Но встречаются конструкции с тремя—четырьмя фильтрующими элементами, смонтированными в одном корпусе.

По качеству очистки фильтры можно разделить на фильтры предварительной очистки (свыше 40 мкм) и тонкой очистки (до 40 мкм). При этом необходимо отметить, что понятия «предварительная очистка» и «тонкая очистка» зависят от конкретных условий применения фильтров и фильтрующих устройств.

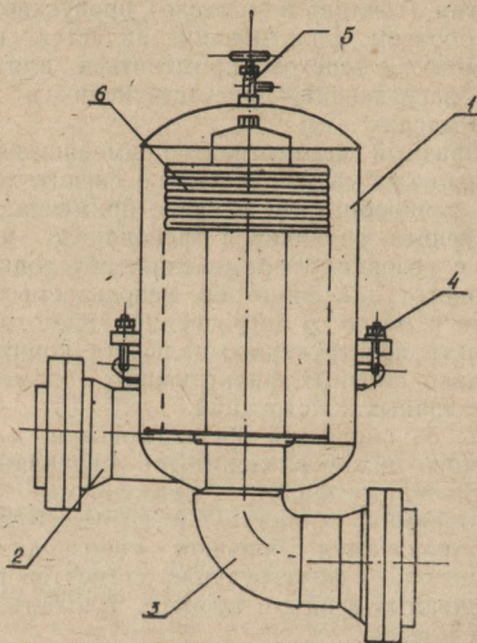


Рис. 1.9. Фильтр ФГН-12ОМ: 1 — корпус
2 — входная труба; 3 — выпускная труба;
4 — крепление корпуса; 5 — воздушный вентиль;
6 — фильтрующий пакет

По назначению фильтры подразделяются на фильтры для очистки топлив и фильтры для очистки масел.

Для заправки техники и очистки топлив при транспортно-складских операциях нашли широкое применение фильтры типа ФГН. Фильтр ФГН (рис. 1.9) представляет собой корпус 1 цилиндрической формы с овальным днищем с приваренными входным 2 и выходным 3 патрубками. Крышка крепится на откидных болтах 4 и уплотняется прокладкой из бензомаслостойкой резины. Сверху крышки имеется вентиль 5 для выпуска воздуха. В корпусе помещен фильтропакет 6. Фильтрация нефтепродуктов в этом фильтре происходит через фильтрационные пакеты из нетканого материала. Пакеты армированы сетчатыми дисками чечевичной формы. При достижении фильтром предельного перепада пакеты заменяются на новые. Технические характеристики фильтров ФГН приведены в табл. 1.22. Фильтры ФГН в основном предназначены для очистки топлив. В случае очистки масел их производительность резко уменьшается.

Для очистки нефтяных масел от загрязнений разработаны и выпускаются фильтры ФМН-10 и ФМН-50. Фильтры по конструкции чечевично-дисковые; фильтра-

Таблица 1.22

Технические характеристики стационарных фильтров типа ФГН
для очистки топлив

Показатели	ФГН-30	ФГН-60	ФГН-120
Пропускная способность, м ³ /с (м ³ /ч)	0,0083(30)	0,0166(60)	0,0332(120)
Максимальное рабочее давление, кПа	800	800	1500
Перепад давления начальный, кПа	50	50	50
Перепад давления предельно допустимый, кПа	150	150	150
Количество слоев фильтрованного материала	2	2	2
Поверхность фильтрации, м ²	1,7	2,4	4,0
Тонкость фильтрации	10—20	10—20	10—20
Ресурс работы в м ³ профильтрованного топлива	500	750	1500

Таблица 1.23

Технические характеристики фильтров типа ФМН
для очистки масел

Показатели	ФМН-10	ФМН-50
Пропускная способность, м ³ /с (м ³ /ч)	0,0028 (10)	0,0138 (60)
Перепад давления, кПа:		
начальный	50	50
предельно допустимый	150	150
Тонкость фильтрации, мкм	15—20	15—20
Габаритные размеры, мм:		
высота	720	1105
диаметр корпуса	420	476
Масса, кг	53	110

ция происходит через нетканый материал, пропитанный латексом. Технические характеристики фильтров ФМН приведены в табл. 1.23. Фильтры ФМН имеют теплоизоляционное покрытие из пенополиуретана, что позволяет эксплуатировать их при отрицательных температурах. Гидравлические характеристики фильтров ФМН при различных вязкостях масел приведены на рис. 1.10 [7].

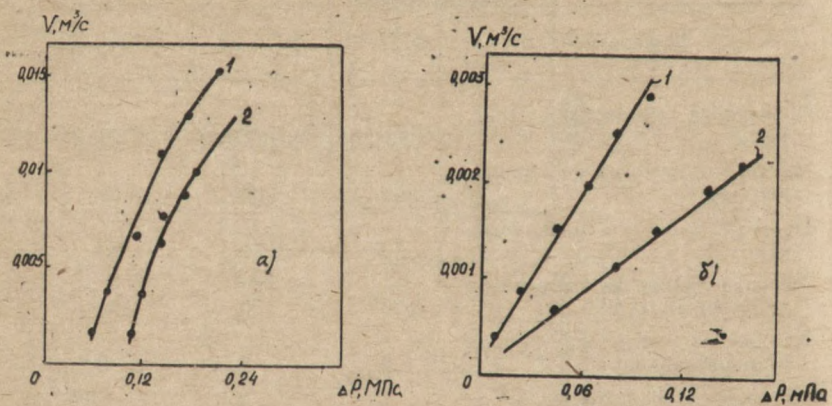
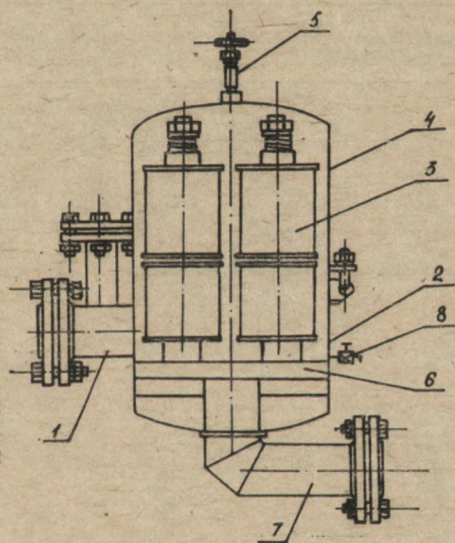


Рис. 1.10. Гидравлические характеристики фильтров ФМН-50 (а) и ФМН-10 (б): 1 — вязкость масла 180 мм²/с; 2 — вязкость масла 320 мм²/с

Для очистки топлив на нефтебазах Государственного комитета по нефтеснабжению объединением «Вторнефтепродукт» Госкомнефтепродукта РСФСР разработан и внедрен в производство фильтр для очистки светлых нефтепродуктов ФОСН-60 пропускной способностью $0,0166 \text{ м}^3/\text{с}$ ($60 \text{ м}^3/\text{ч}$). От фильтров ФГН он отличается уменьшенным начальным гидравлическим сопротивлением, увеличенной площадью фильтрации, применением сменных фильтрующих элементов «Реготмас-561» [55]. Последнее позволяет менять тонкость фильтрации установкой элементов со шторой из другого материала, создает значительные удобства в обслуживании, увеличивает площадь фильтрации.

Фильтр ФОСН-60 оснащен насосом типа ЗК9, но может быть смонтирован и с другими насосами производительностью до $60 \text{ м}^3/\text{ч}$ [32]. Конструкция фильтра ФОСН-60 показана на рис. 1.11, а техническая характеристика приведена в табл. 1.24. Отношение площади фильтрации к объему корпуса фильтра для ФОСН-60 в 2,1 раза выше, чем для ФГН.

Рис. 1.11. Фильтр ФОСН-60: 1 — входная трубка с фланцем; 2 — корпус фильтра; 3 — сменные фильтрующие эл-ты; 4 — крышка корпуса; 5 — кран для выпуска воздуха; 6 — коллектор для сбора очищенного топлива; 7 — выходная труба с фланцем; 8 — кран для спуска отстоя



Для установки на линии приема из железнодорожных цистерн в объединении «Вторнефтепродукт» разработан фильтр ФСУ (фильтр секционный унифицирован-

ный) [19], который отличается большой пропускной способностью за счет рационального размещения фильтрующих элементов в корпусе, количество которых для фильтра с пропускной способностью $150 \div 200 \text{ м}^3/\text{ч}$ исчисляется десятками.

Общий вид фильтра ФСУ представлен на рис. 1.12. Фильтр состоит из подводящего коллектора 1, отводящего 2 и нескольких промежуточных секций (унифицированных патронов) 3, число которых может меняться в зависимости от заданной пропускной способности. Каждая секция содержит два унифицированных патрона, в которых установлено по два фильтрующих элемента 4 типа «Реготмас-561» [55].

Таблица 1.24

Техническая характеристика фильтра ФОСН-60

№ п/п	Показатели	Значение
1.	Пропускная способность фильтра на дизельном топливе при $+20^\circ\text{C}$, перепада давления до $0,3 \text{ кгс/см}^2$ и тонкости фильтрации 30 мкм не более, $\text{м}^3/\text{ч}$	60
2.	Количество сменных фильтрующих элементов «Реготмас-561», шт.	8
3.	Площадь фильтрации, м^2	10
4.	Максимальное рабочее давление в корпусе фильтра не более, кгс/см^2	6,0
5.	Предельно допустимый рабочий перепад давления в корпусе, кгс/см^2	1,5
6.	Тонкость фильтрации, мкм	30
7.	Фильтрационный материал	Нетканый материал НКФМ-3
8.	Габаритные размеры:	
	высота (без крана для выпуска воздуха), мм	1090
	диаметр корпуса, мм	400
9.	Диаметр подсоединительных трубопроводов, мм	100
10.	Масса не более, кг	90

Крепление фильтрующих элементов в патронах производится с помощью специального легкосъёмного устройства. Стыки между фильтрующими элементами, а также крышкой съёмного устройства уплотняются ре-

зиновыми прокладками. В этом случае топливо поступает в подводящий коллектор, оттуда через окна попадает в патроны. Проходя через фильтрующие элементы, топливо очищается и выходит через отводящий коллектор.

Пропускная способность при фильтрации с тонкостью 30 мкм и числе секций 2 составляет 72 м³/ч, 3—108 м³/ч; 4—144 м³/ч; 5—180 м³/ч.

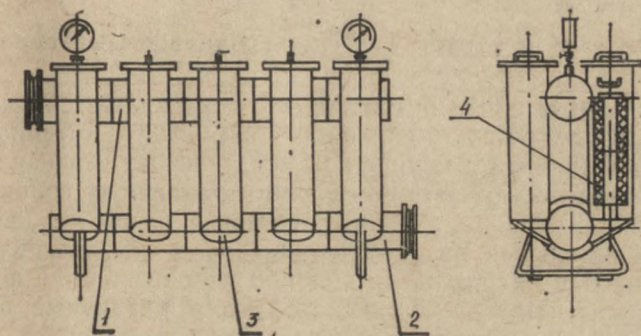


Рис. 1.12. Фильтр ФСУ-150: 1 — впускная труба; 2 — выпускная труба; 3 — корпус; 4 — фильтрующие элементы

Фильтры, устанавливаемые в гидросистемах различных машин, системах топливоподачи и системах смазки двигателей, конструктивно представляют собой корпус с фильтрующим элементом внутри, оснащенным деталями крепления и уплотнения [2, 5, 8, 9, 10]. Топливные фильтры тепловозов автомобильных и тракторных двигателей для увеличения эффективности осаждения загрязнений снабжаются отстойниками, обычно расположенными в нижней части корпуса.

Продление срока службы фильтров тонкой очистки может быть достигнуто применением многоступенчатой фильтрации с последовательным увеличением тонкости фильтрации. При этом выбор требуемого количества и вида ступеней очистки (типа фильтрующих элементов) должен осуществляться на основании специального технико-экономического анализа.

ГЛАВА II

ФИЛЬТРОВАЛЬНЫЕ БУМАГИ И КАРТОНЫ. СВОЙСТВА И СПОСОБЫ ИСПЫТАНИЙ

2.1. Бумага и картон как фильтровальные материалы

Фильтровальные бумаги и картоны являются одним из наиболее распространенных пористых материалов для топливно-масляных фильтров. Основу материалов этого типа составляют композиции различных волокон.

Для изготовления фильтровальных бумаг и картонов применяются как натуральные, так и химические волокна. Из натуральных волокон в производстве фильтровальных материалов используются различные виды целлюлозы на основе хвойных и лиственных пород древесины, а также хлопковые волокна.

С целью улучшения фильтрующих характеристик в состав всех современных фильтровальных бумаг и картонов в различных количествах вводят древесное волокно, обработанное раствором щелочи (мерсерезованную целлюлозу).

С целью повышения механической прочности в композицию бумаги вводят полимерные связующие химические волокна. Для этой цели наибольшее применение нашли водорастворимые волокна виола с температурой растворения в воде $60 \div 70^\circ\text{C}$; волокна, прошедшие вытяжку и термообработку с температурой растворения в воде $70 \div 100^\circ\text{C}$; термообработанные и ацелированные волокна, не растворяющиеся в воде при длительном кипячении [35].

Для придания фильтровальным материалам специальных свойств (водостойкость, гидрофобность и т. д.) в их состав вводятся различные компоненты: меламинаформальдегидную смолу, канифольный клей и др. Широко применяется способ пропитки готового фильтровального материала растворами различных смол, например, раствором фенолформальдегидной смолы в этиловом спирте.

В зависимости от предъявленных требований, наличия материала и оборудования фильтровальные бумаги и картоны можно изготовить из следующего сырья: 1) из древесных целлюлозных волокон; 2) из смеси древесных целлюлозных волокон, обработанных раствором щелочи и необработанных; 3) из смеси древесных целлюлозных, обработанных щелочью и хлопковых волокон; 4) из смеси древесных целлюлозных, обработанных щелочью, и синтетических волокон; 5) из древесных целлюлозных волокон, обработанных щелочью с армированием микалентой; 6) из 100% хлопковых волокон; 7) из 100% синтетических волокон.

Комплекс составляющих, входящих в композиции фильтровальных бумаг, а также различные компоненты (смолы, клей и т.д.), добавляемые в них, в совокупности с технологией производства бумаг обеспечивают их необходимые физико-механические и фильтрационные свойства.

Фильтровальные бумаги и картоны по сравнению с другими пористыми материалами могут быть изготовлены с регламентированными размерами и объемом пор при сравнительной дешевизне и технологичности. Эти свойства обусловили широкое распространение пористых материалов на целлюлозной основе для изготовления фильтрующих штор.

Фильтровальные бумаги и картоны, применяемые для очистки нефтяных топлив и масел, должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- обладать достаточной механической прочностью, в том числе при воздействии вибрационных и тепловых нагрузок, стойкостью к очищаемому продукту во всем диапазоне рабочих температур независимо от продолжительности контактирования;

- не оказывать отрицательного влияния на физико-химические свойства очищаемого масла и не загрязнять его частицами, вымываемыми из материала в процессе эксплуатации;

- иметь возможно малое гидравлическое сопротивление при высокой удельной пропускной способности;

- обеспечивать необходимую тонкость и полноту фильтрации при высоком ресурсе работы и не снижать этих показателей в процессе эксплуатации;

— обладать способностью к многократной регенерации или, при однократном использовании, полностью утилизироваться, не загрязняя при этом окружающую среду;

— обладать удовлетворительными экономическими показателями: быть недорогими, несложными в производстве, изготавливаться из недефицитного сырья;

— быть технологичными при изготовлении: легко подвергаться обработке, соединению, герметизации и другим операциям.

Практически невозможно удовлетворить всем перечисленным требованиям, так как улучшение одних показателей часто вызывает снижение других. Например, повышение тонкости фильтрации материала вызывает увеличение его гидравлического сопротивления и уменьшение удельной пропускной способности, улучшение механических свойств материала приводит к возрастанию его стоимости и т. д. Поэтому на практике при выборе фильтровальных бумаг стараются обеспечить наиболее важные в данном конкретном случае требования, добиваясь по возможности удовлетворительного качества по другим показателям.

Фильтровальные бумаги и картоны, применяемые в фильтрующих элементах, имеют ряд преимуществ по сравнению с другими материалами:

- обеспечивают большую площадь фильтрации;
- сравнительно дешевы (цена 1 кг от 2 до 6 руб.);
- при применении подслояных сеток из металла и пластмассы обеспечивают элементу большую механическую прочность;

- обладают достаточной водостойкостью при применении пропитки различными смолами;

- легко подвергаются гофрированию и термостатированию;

- не загрязняют очищаемую рабочую жидкость волокнами материала.

В Советском Союзе в настоящее время выпускается достаточно широкий ассортимент фильтровальных бумаг и картонов, обеспечивающих диапазон производительности фильтрующих элементов при тонкости фильтрации 3—40 мкм (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Марка, ТУ	Свойства	Технические показатели
1	2	3
ДРКБ ТУ 81-04-173-72	Бумага способна задерживать частицы свыше 40 мкм	Толщина $0,6 \pm 0,1$ мм Удельная пропускная способность $10000 \text{ см}^3/\text{ч}$. Сопротивление разрыву в продольном направлении (кгс), не менее 2,0. Сопротивление продавливанию, кгс/см ² , не менее 2,5
БФМ ГОСТ 20806-75	Бумага способна задерживать частицы свыше 25 мкм. Клеевая бумага, содержащая в композиции белый канифольный клей и меламиноформальдегидную смолу	Толщина $0,35 \div 0,42$ мм Время свободного истечения, с, не более 12. Сопротивление разрыву (кгс) не менее 1,8. Сопротивление продавливанию кгс/см ² , не менее 1,0
КФМ ТУ 81-04-245-73	Картон способен задерживать частицы свыше 25 мкм. Пропитан фенолформальдегидной смолой, имеет рифление глубиной 0,12 мм. В процессе изготовления фильтрующих элементов подвергается термостатированию	Толщина $0,9 \pm 0,1$ мм Время свободного истечения, с, не более — 11. Предел прочности при растяжении (в среднем по двум направлениям, кгс/см ² , не менее — 20. Сопротивление продавливанию, кгс/см ² , не менее 1,3
АФБ-1К ТУ 81-04-42-71	Бумага способна задерживать частицы свыше 12 мкм. Специальная фильтровальная бумага, подвергается крепированию	Толщина $0,25 \div 0,35$ мм Пропускная способность, с — 35. Разрывная длина в продольном направлении, м, не менее — 2000. Сопротивление продавливанию, абсолютное, кгс/см ² , не менее — 0,5

1	2	3
БТ-3П ТУ 81-04-478-77	Бумага способна задерживать частицы свыше 3 мкм. Пропитана в спиртовом растворе фенолформальдегидной смолы, имеет рифление глубиной 0,12 мм	Толщина 0,3÷0,05 мм Соппротивление току воздуха при скорости 0,83 см/с (мм вод. ст.) не более 450. Разрывной груз в продольном направлении (кгс) не менее 6,9
БТ-10П ТУ 81-04-568-80	Бумага способна задерживать частицы свыше 10 мкм. Пропитана в спиртовом растворе формальдегидной смолы, имеет рифление глубиной 0,12 мм	Толщина не более 0,45 мм Соппротивление току воздуха при скорости 0,83 см/с (мм вод. ст.) не более — 2. Разрывной груз в продольном направлении (кгс) не менее 5
БТ-5П ТУ 81-04-581-80	Бумага способна задерживать частицы свыше 5 мкм. Пропитана в спиртовом растворе формальдегидной смолы. Рифление отсутствует	Толщина не более 0,42 мм Соппротивление потоку воздуха при скорости 0,83 см/с (мм вод. ст.) не более 10. Разрывной груз в продольном направлении (кгс) не менее 7

2.2. Основные показатели физико-механических свойств фильтровальных бумаг

Физико-механические свойства бумаг, в том числе и фильтрационные, зависят от комплекса свойств материалов, входящих в композицию бумаги, их особенностей и способов подготовки, а также от технологических параметров изготовления бумаги, оказывающих влияние на структуру бумажного листа (наполнение, проклейка, условия формования, сушка, отделка и т. п.).

К основным физико-механическим показателям, по которым производится испытание фильтровальных бумаг и картонов для определения соответствия технической документации, являются: 1) масса, 1 м^2 ; 2) толщина; 3) плотность (объемная масса); 4) разрывной груз; 5) сопротивление излому (число двойных перегибов); 6) герметичность; 7) сопротивление току воздуха.

Масса квадратного метра бумаги или картона, выраженная в г/м^2 , — наиболее распространенный показатель качества [34]. Массу 1 м^2 определяют путем взвешивания. При контрольных испытаниях для этих целей применяются шаблоны размером $100 \times 100 \text{ мм}$. Отклонение от размеров образцов не должны превышать $\pm 0,5\%$. Для испытаний берут не менее 5 образцов, вырезанных из рулона.

Испытуемые образцы кондиционируют не менее 3 ч при 65% относительной влажности воздуха и 20°C . Результаты взвешивания выражаются в г/м^2 с точностью до 1 г.

Массу 1 м^2 определяют по формуле

$$x = G/F \cdot 10\,000, \quad (2.1)$$

где G — масса образца, г; F — площадь, см^2 .

Толщина бумаги или картона — это расстояние между двумя гладкими поверхностями площадью 1 см^2 . На показатель толщины влияет влажность и давление измерителя. В СССР и европейских странах принято толщину бумаги и картона выражать в миллиметрах или микрометрах. Учитывая неравномерность толщины бумаг и картонов, измерение проводят в 4—6 точках испытуемого образца, имеющего размеры 100×100 или $200 \times 250 \text{ мм}$. За показатель толщины принимается среднее арифметическое из всех проведенных измерений с округлением до 1 мкм. Плотность, или объемная масса, является важным признаком качества бумаги, оказы-

вающим влияние на все физико-механические и фильтрационные свойства. Плотность выражается через массу 1 м² бумаги и ее толщину по следующей формуле:

$$G' = \frac{g}{\delta},$$

где g — масса 1 м²; δ — толщина, мкм.

Плотность зависит от свойств исходного полуфабриката, степени помола волокна, проклейки и т. д. На показатель плотности при других равных параметрах оказывает большое влияние пористость.

Плотность применяется в качестве сравнительного показателя при сопоставлении бумаг с одинаковой композицией.

Разрывной груз характеризуется работой, затраченной с момента приложения нагрузки до достижения предельного разрывного усилия $P_{\max}$ (предела прочности). Для определения работы строится график в координатах нагрузка — удлинение (рис. 2.1.). Работа соот-

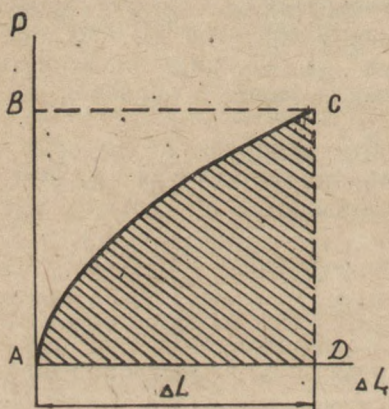


Рис. 2.1. К определению работы разрыва фильтровальных бумаг

ветствует площади АСДА, являющейся интегралом усилия, затрачиваемого в условиях измерения длины.

$$\bar{L} = \eta P_{\max} \Delta l;$$

$$\eta = \frac{(A, C, DA)}{(ABCD)},$$

где $P_{\max}$ — разрывное усилие; Δl — измерение длины при разрывном усилии полоски с длиной $l_0 = 180$ мм. и шириной $b = 15$ мм.

Одним из важных свойств бумаг и картонов является способность не разрушаться при многократных изгибах.

При изготовлении фильтрующих элементов с винтовой, а особенно со спирально-складчатой шторой, фильтровальная бумага подвергается многократным изгибам в различных направлениях. Изгиб при испытаниях осуществляется в искусственных условиях, далеких от условий изгиба при изготовлении фильтрующих элементов. Распространен метод определения числа двойных перегибов на приборе, состоящем из станины, на которой установлены две колонки с патроном, кривошипно-шатунного механизма, счетчика с механическим выключателем и привода.

Колонки предназначены для закрепления и натяжения испытуемой полоски. Внутри каждой колонки имеется спиральная пружина с регулируемым натяжением, к одному из концов которой прикреплен зажим. Губки зажима перемещаются во время испытаний, опираясь на рамки.

Патрон состоит из двух пар вертикально расположенных роликов, в зазоре между которыми находится пластинка с прорезью, которая сгибает полоску образца. Пластинка прикреплена к ползуну кривошипно-шатунного механизма, при помощи которого совершает возвратно-поступательное движение.

Вал приводного механизма соединен со счетчиком, фиксирующим число двойных перегибов испытуемой полоски. В момент разрыва счетчик автоматически отключается. Скорость вращения маховика должна обеспечивать 120 ± 5 изломов в минуту.

Натяжение полоски определяется толщиной образца: при толщине 0,25 мм — 1 кг, при большей — 1,3 кг.

Герметичность представляет собой показатель, который косвенно характеризует пористую структуру материала и равен давлению проскока первого пузырька воздуха через бумагу или картон, погруженные в бензин с помощью специального зажима. Принципиальная схема установки представлена на рис. 2.2 и состоит из компрессора, манометра, зажимного устройства.

Испытания проводятся в бензине Б-70 (ГОСТ 1012-72). Образец бумаги или картона диаметром 60 мм зажимают гайкой в корпусе зажимного устройства и помещают в емкость с бензином Б-70 на глубину 20 мм от

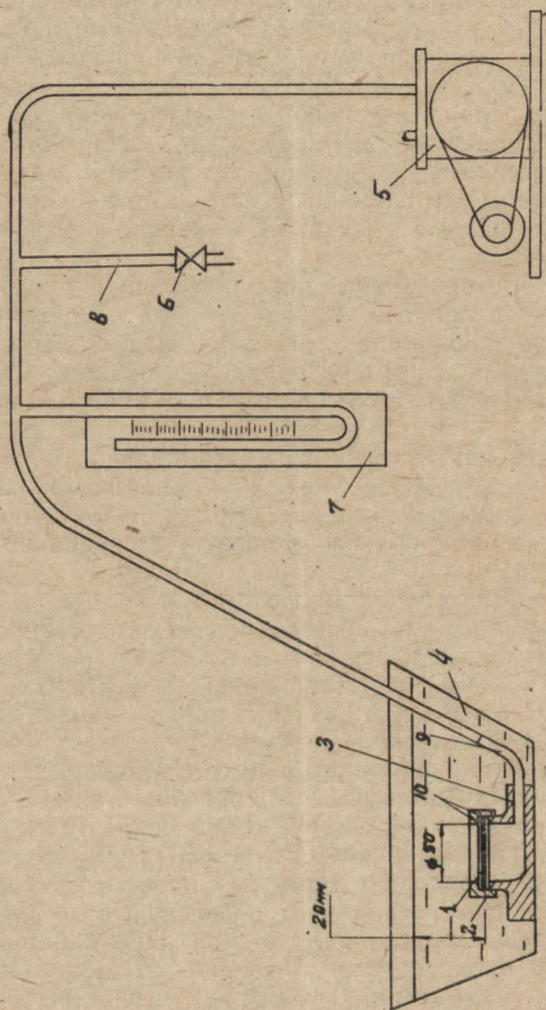


Рис. 2.2. Установка для проверки фильтроматериалов на герметичность: 1 — образец материала; 2 — гайка зажимная; 3 — зажимное устройство; 4 — емкость с бензином; 5 — компрессор; 6 — клапан; 7 — манометр водяной; 8 — трубка резиновая; 9 — трубка металлическая; 10 — кольцо уплотнительное

поверхности материала. Включают компрессор и с помощью зажима постепенно повышают давление в системе. Давление, при котором замечено появление первого пузырька воздуха над поверхностью испытуемого образца, отсчитывают по манометру и принимают за показатель герметичности.

Значение герметичности P испытуемого фильтроматериала определяется как среднее арифметическое показаний герметичности пяти образцов при расхождении результатов не более чем на 10%. По показателю герметичности оценивается абсолютная тонкость фильтрации фильтровальных материалов (АТФ). Определение АТФ согласно ГОСТу 20806-75 производится по формуле

$$\text{АТФ} = 164100 \cdot P^{1,24} \text{ мкм},$$

где P — герметичность, Па.

Сопротивление току воздуха является показателем, косвенно определяющим пропускную способность бумаг и картонов при фильтрации топлив, масел и других жидкостей. Определение этого показателя производится на установке, состоящей из компрессора, ресивера, реометра, зажимного устройства и манометра.

Образец материала помещают в зажимное устройство. Включают компрессор и с помощью реометра устанавливают постоянную скорость воздуха, проходящего через образец, равную $0,83 \cdot 10^{-2}$ м/с. Сопротивление току воздуха, оказываемое испытуемым образцом бумаги, отсчитывают по манометру.

Физико-механические и фильтрационные свойства серийно выпускаемых фильтровальных бумаг и картонов приведены в табл. 2.2, а основные области применения по видам бумаги — в табл. 2.3.

2.3. Основные структурные характеристики фильтровальных материалов

Структурные характеристики пористых материалов необходимы для описания фильтрационной гидродинамики, физических и физико-химических процессов задержки загрязнений, протекающих в них.

Основными структурными характеристиками пористых материалов являются пористость Ψ , удельная по-

Таблица 2.2

Физико-механические и фильтрационные свойства фильтровальных материалов

Материал	Масса 1 м ² , г	Толщина, мм	Глубина рифлен., мм	Объем. масса, г/см ³	Разрывной груз, кгс		Сопротивление назому	Абсолют. сопро- тив. продавт., кгс/см ²	Герметич., мм вод. ст.	Тонкость фильтрации, мкм		Удельная про- пускная спосо- б. мл/см ² мин v=30 с ст, P=0,1 кгс	№ ТУ, ГОСТа
					продол.	попереч.				АТФ	НТФ		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ДРКБ	131	0,68	—	0,19	8,13	6,25	2401	6,0	80	42,2	35,1	166,7	ТУ-81-04 178-72
БФМ	115	0,35	—	0,33	2,7	2,57	147	2,0	130	23,2	18,4	35,2	ГОСТ 20806-75
КФМ	196	0,87	0,14	0,22	2,7	2,57	147	2,0	120	25,5	20,5	36,7	ТУ-81-04 245-73
КФВ	140	0,65	0,12	0,22	4,88	3,33	2	1,59	120	25,6	20,5	83,3	ТУ-81-04 246-73
ПКВ	139	0,47	—	0,29	3,93	2,50	148	2,15	150	19,4	15,2	36,7	ГОСТ 20358-74
ПКВ-II	150	0,56	0,03	0,27	10,1	7,80	71	3,95	120	25,6	20,6	35,2	ТУ-81-04 261-73

Продолжение табл. 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
КОВН	150	0,77	0,19	0,13	3,6	2,3	3	1,1	90	36,5	30,1	40,7	Опытная
МФ-16	197	1,08		0,18	6,94	4,70	10 ⁴	8,2	80	42,2	35,1	120,6	ТУ ОП 81-04-10
БТ-15П	140	0,53	0,07	0,26	8,9	6,9	3,0	313	170	16,6	12,8	14,8	Опытная
БТ-10П	130	0,38	0,12	0,45	10,7	7,8	8	2,7	140	12,8	9,7	7,3	ТУ-81-04 568-80
БФДТ	190	0,33		0,58	17,5	8,7	1487		490	4,5	3,1	0,2	ТУ-81-04 244-73
БТ-5П	186	0,42		0,44	19,2	12,3	113	6,5	330	7,3	5,3	4,1	ТУ ОП-81 07-14-79
БТ-3П	163	0,46	0,19	0,35	12,5	6,53	10 ³	4,27	420	5,4	3,8	0,7	ТУ-81-04 478-77
БТК	186	0,41		0,45	11,3	6,3	1428	3,2	270	9,4	6,9	4,1	Опытная
БТ	200	0,40		0,50	8,6	5,2	400	2,6	300	7,5	5,5	3,7	ТУ-81-04 141-72

Продолжение табл. 2.2

I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
АФБ-1к (рифл.)	135	0,51	0,11	0,26	9,4		14	1,5	205	13,2	10,0	25,4	—
АФБ-1к (осн.)	130	0,29		0,45	4,5	2,6	15	1,5	220	12,1	9,1	5,3	ТУ-81 0442-71
АФБ-5	190	0,37		0,51	12,2	6,7	20	1,6	350	6,8	4,9	1,2	ТУ 81-04 144-72
КФДТ	650	2,5		0,26					175	16,0	12,3	13,3	ТУ-81-04 421-76

Таблица 2.3

Основные виды и области применения фильтровальных видов бумаги для очистки нефтяных топлив и масел

№ п/п	Тон- кость филъ- рации, мкм	Сопротив- ление току воздуха	Основные области применения
1	30—20	0,2—1,0	Очистка топлива и смазочного масла карбюраторных двигателей и рабочих жидкостей станков и механизмов
2	10—15	2—10	Очистка топлива и частично поточная очистка смазочного масла в двигателях внутреннего сгорания, рабочих жидкостей гидросистем самолетов, станков
3	5—10	10—30	Очистка дизельного, авиационного топлива, рабочих жидкостей гидросистем станков, самолетов
4	2—5	30—80	Тонкая очистка дизельного и авиационного топлива

верхность $S_{уд}$, а также размер пор. Рассмотрим методы определения этих характеристик.

Пористость. Пористостью тела называется отношение объема пустот (пор) V_n к объему тела V :

$$\Psi = \frac{V_n}{V}. \quad (2.2)$$

Расчет пористости по формуле обычно ведут методом взвешивания или вытеснения.

В первом случае при известной массе сухого G_c и насыщенного жидкостью тела G_n пористость определяют по формуле

$$\Psi = \frac{G_n - G_c}{Vg\rho_0}, \quad (2.3)$$

где ρ_0 — плотность жидкости.

Точность оценки пористости по формуле зависит от степени пропитки пористых тел жидкостью. Поэтому часто пропитку ведут в условиях вакуума или в условиях принудительной фильтрации жидкости с последу-

ющей выдержкой образцов в жидкости в течение нескольких часов.

Формулу применяют также при использовании метода вытеснения жидкости пористым телом в мерном цилиндре. В этом случае приращение объема жидкости в цилиндре равно объему скелета пористого тела $V_{ск}$, а расчетная формула для пористости приобретает вид

$$\Psi = \frac{V - V_{ск}}{V} = 1 - \frac{V_{ск}}{V}. \quad (2.4)$$

При использовании формул (2.2) — (2.4) объем пористых образцов простой конфигурации определяют расчетом по результатам обмера тела.

Пористость тела можно также определить по его объему, массе и плотности компактного материала, из которого оно изготовлено. Для этого формула (2.2) приводится к виду

$$\Psi = 1 - \frac{\rho}{\rho_m}, \quad (2.5)$$

где ρ_m ; ρ — плотности частиц компактного материала тела и самого пористого тела.

Кроме указанных иногда применяют статистические, оптические и другие методы определения пористости, подробное описание которых дано А. Э. Шейдеггером [36].

Удельная поверхность. Эта характеристика определяется отношением поверхности пор к общему объему пористого тела. Удельная поверхность идеализированной пористой среды, состоящей из сфер одинакового диаметра, может быть выражена формулой

$$S_{уд} = \frac{6(1 - \Psi)}{d_4}. \quad (2.6)$$

Экспериментальное определение удельной поверхности может производиться различными методами. К таковым относятся оптические, адсорбционные, методы теплопроводности и др. [36]. Наибольшее распространение получили гидродинамические методы, основанные на теории гидравлического радиуса [4].

Размер пор. Любое пористое тело представляет собой систему каналов пор различной формы, образованных промежутками между частицами или волокнами материала, составляющего его скелет. Форма поперечного сечения пор носит сложный характер. Практиче-

ски все поры имеют свою форму и существенно отличаются друг от друга по размерам.

Для характеристики пор обычно используют распределение их по размерам, а также понятия максимального и среднего диаметра пор по размерам. Имеет место корреляция максимального и среднего размеров пор.

Было бы желательно определять геометрическую величину, которая характеризовала бы размеры пор в любой среде. Однако система пор образует очень сложную поверхность, которую геометрически трудно представить. По-видимому, нет возможности найти какой-нибудь простой параметр или какую-нибудь простую функцию, которая бы описала эту поверхность.

В определении размера пор удобной мерой является диаметр. Однако термин «диаметр» имеет геометрический смысл только в том случае, если все поры имеют цилиндрическую форму или близкую к ней. Тем не менее такое представление о диаметре для фильтровальных бумаг и картонов геометрически совершенно бессмысленно, так как они представляют собой комбинацию беспорядочно уложенных волокон.

При изучении поровых структур широко применяют понятия размера пор, распределения пор по размерам. Однако некоторые авторы расходятся в определении этих характеристик. Так, А. Э. Шейдеггер [36] определяет диаметр поры во всякой точке внутри порового пространства как диаметр наибольшей сферы, которая содержит данную точку и остается целиком внутри пространства поры. Подобное определение диаметра поры вполне возможно с точки зрения геометрии, однако практически размеры пор находят по каким-нибудь свойствам среды, например капиллярным, на основе подбора такой капиллярной, т. е. трубчатой модели, которая обладала бы такими же свойствами, что и среда. В. Н. Николаевский [36, с. 221] дает следующее определение: «Диаметром поры является такой диаметр трубки, которая эквивалентна данной поре по своим капиллярным свойствам». Это определение наилучшим образом оправдывает существующие экспериментальные методы оценки размеров пор.

Функция распределения пор по размерам $P(d)$ вводится следующим образом:

$$F(d_n) = \int_0^{d_n} P(d) dd_n; \quad P(\infty) = 1, \quad (2.7)$$

где $F(d_n)$ — часть порового пространства, которое имеет поровый диаметр меньше, чем d_n ; $P(d)$ — плотность функции распределения.

Распределение пор по размерам можно характеризовать определенными параметрами. Лучше всего это достигается подгонкой соответствующих различных кривых стандартного распределения, известных из математической статистики, к действительным кривым распределения пор; параметры кривых стандартного распределения в этом случае служат параметрами для кривых распределения пор. Наиболее простыми кривыми стандартного распределения, подходящими для этой цели, являются различные типы кривых Гаусса.

Экспериментальное определение распределения пор по размерам производится различными методами. Для оценки поровой структуры грунтов, например, часто используют метод нагнетания ртути. При этом получают кривую капиллярного давления, которая, в свою очередь, интерпретируется в отношении распределения пор по размерам. Применяется также метод капиллярной конденсации, основанный на уравнении Кельвина, для давления насыщенного пара в цилиндрическом капилляре радиуса r [36]:

$$\ln\left(\frac{p_0}{p}\right) = \frac{2\sigma\mu}{rRT},$$

где σ — поверхность натяжения; μ — молекулярная масса;

T — абсолютная температура; R — газовая постоянная.

Как следует из уравнения Кельвина, радиус наименьших пор, которые могут быть заняты определенной жидкостью при постоянной температуре, является функцией давления P . Поэтому после снятия адсорбционной изотермы (в специальном адсорбционном аппарате) по значениям P находят значения r и строят соответствующее распределение пор по размерам [36].

Дифференциальные кривые распределения пор по размерам для некоторых типов фильтровальных бумаг показаны на рис. 2.3 [65].

Необходимо отметить, что использование методов ртутной порометрии и капиллярной конденсации требует сложной аппаратуры. Кроме того, работа с токсичной ртутью требует мер предосторожности.

В последнее время для определения размеров пор в фильтрующих материалах стал широко применяться метод «воздушных пузырьков» [8]. Метод основан на известном уравнении Кантора:

$$p = gh\rho_0 + \frac{4\sigma}{d_n} \cos \theta, \quad (2.8)$$

где h — уровень жидкости над пористым образцом; ρ_0 — плотность жидкости; σ — поверхностное натяжение жидкости; θ — угол смачивания жидкостью стенок поры; d_n — диаметр поры; p — давление газа, при котором происходит вытеснение жидкости из поры (появляется первый пузырек газа).

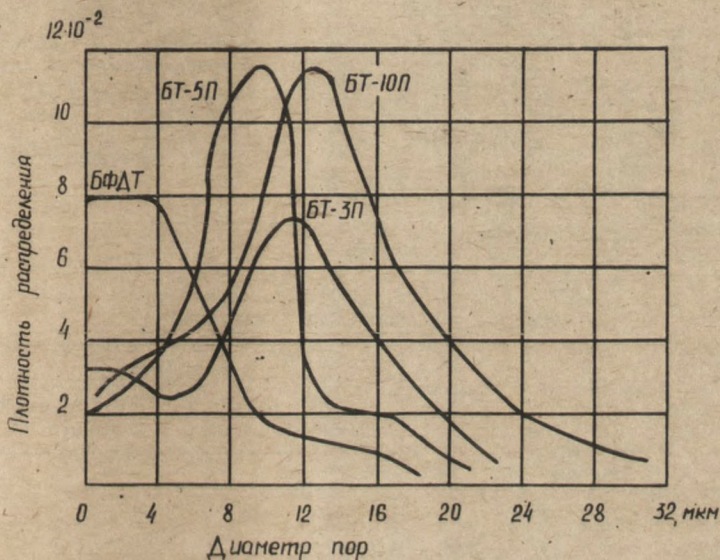


Рис. 2.3. Дифференциальные кривые распределения пор по размерам в фильтровальных бумагах

Метод «воздушных пузырьков» не позволяет прямо определить распределение пор по размерам, так как первые пузырьки появляются над максимальными порами, присущими данной фильтрующей перегородке. Между тем важным преимуществом этого метода являются следующие обстоятельства. Если замерять, последовательно повышая давление, расход газа через ту часть

пор, из которых жидкость вытеснена, то появляется возможность определить функцию распределения удельных расходов жидкости, а следовательно, и пор по размерам [37].

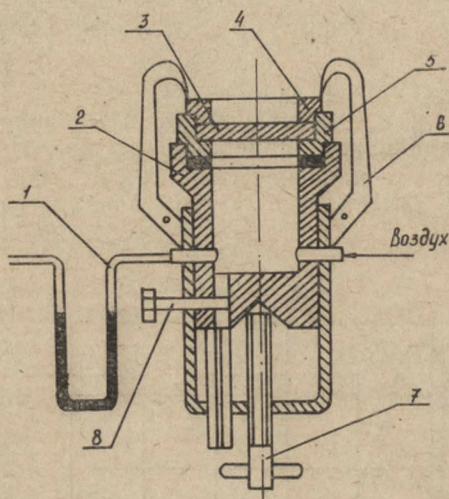


Рис. 2.4. Устройство для определения размеров пор: 1 — жидкостный манометр; 2 — корпус; 3 — испытуемый пористый образец; 4 — верхний зажим; 5 — нижний зажим; 6 — скоба; 7 — винт; 8 — фиксатор

Таблица 2.4

Основные структурные характеристики
фильтровальных бумаг и картонов

Фильтровальный материал	Ψ	d_n , мкм	
		Метод «воздушных пузырьков»	Метод ртутной порометрии*
ДРКБ	0,9	100	—
КФМ	0,82	61	—
БФМ	0,75	61	—
БТ-15П	0,72	43,5	—
БТ-10П	0,62	38	27,8
БТ-5П	0,65	30	23,1
БТК	0,62	38,4	—
БТ-3П	0,58	19,4	16,3
БФДТ	0,48	12	11,8

* Средний размер пор по методу ртутной порометрии определялся интегральным осреднением дифференциальных кривых распределения (рис. 2.3).

Максимальный и средний размеры пор также могут быть определены методом вытеснения жидкости. Схема установки для определения максимального и среднего размера пор приведена на рис. 2.4. Перед опытом образцы заполняют жидкостью с малым поверхностным натяжением (спирт, бензин, керосин), после чего образец помещают в специальное приспособление и на его поверхность наливают тонкий слой той же жидкости (2—3 мм). Затем под образец подают газ, давление которого плавно увеличивают, фиксируют давление газа, когда на поверхности образца появляется первый пузырек. Это давление соответствует максимальному размеру пор $d_{\max}$. Дальнейшее увеличение давления приводит к началу интенсивного выхода пузырьков по всей поверхности. По этому давлению определяют средний размер пор, используя формулу (2.8), без учета давления столба жидкости.

Значения основных структурных характеристик некоторых видов фильтровальных бумаг и картонов представлены в табл. 2.4.

ГЛАВА III

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ БУМАГ И КАРТОНОВ

3.1. Гидравлические свойства фильтровальных материалов в области линейной и нелинейной фильтрации

Гидравлические свойства фильтров из бумаги и картона зависят от гидравлических свойств пористых фильтрационных материалов. Эти свойства в начальный период работы оцениваются гидравлической характеристикой, которая может быть выражена зависимостью перепада давления на перегородке Δp от его удельной пропускной способности, представляющей количества фильтрата, проходящего через единицу поверхности в единицу времени. Для пористых перегородок эта зависимость может быть представлена в виде

$$\Delta p = f(v), \quad (3.1)$$

где v — скорость фильтрации.

Определение гидравлической характеристики обычно проводят экспериментально, прокачивая топливо через испытуемый материал с переменной подачей.

Течение жидкости в пористой среде является частным случаем струйного движения жидкости между непроницаемыми стенками, поэтому вследствие низких скоростей оно описывается известным законом Дарси, устанавливающим линейную зависимость между Δp и v :

$$v = K \frac{\Delta p}{\mu \delta}, \quad (3.2)$$

где K — коэффициент проницаемости пористой среды, имеющий размерность квадрата длины, определяемый геометрией порового пространства фильтрационного материала; μ — вязкость жидкости; δ — толщина фильтрующей перегородки.

Большое число исследований по выявлению зависимости коэффициента проницаемости от структуры пористой среды проводилось в области подземной гидрога-

зодинамики [4]. Анализ этих и ряда других работ показывает, что в общем виде коэффициент проницаемости можно выразить функцией трех величин:

$$K = f(\alpha; \Psi; d_n), \quad (3.3)$$

где α — безмерный коэффициент распределения пор по размерам; Ψ — пористость; d_n — средний размер пор.

Установление зависимости (3.3) в явном виде представляет практический интерес для расчетного определения проницаемости фильтровального материала по одному из параметров: пористости или среднему размеру пор. Отыскание корреляционной связи (3.3) возможно при наличии кривых распределения пор по размерам.

Анализ закона Дарси (3.2) показывает, что он описывается двумя безразмерными критериями, характеризующими подобие фильтрационных течений в пористых перегородках. Эти критерии могут быть получены путем приведения к безразмерному виду уравнения (3.2):

$$\frac{\Delta p \sqrt{K}}{\rho v \delta} = \frac{\mu}{\rho v \sqrt{K}}$$

или

$$\lambda = \frac{1}{\text{Re}}, \quad (3.4)$$

где λ — коэффициент гидравлического сопротивления перегородки; Re — критерий Рейнольдса с определяющим геометрическим параметром $\sqrt{K}$.

Произведение критериев λ и Re дает произвольный критерий, именуемый критерием Лагранжа:

$$\text{La} = \lambda \cdot \text{Re} = \frac{\Delta p K}{\mu \delta} = 1,0.$$

Постоянство критерия Лагранжа свидетельствует об автомодельности процессов фильтрации жидкостей через пористые перегородки в области закона Дарси.

Автомодельность процессов фильтрации нефтяных топлив и масел, существенно отличающихся по своим физическим свойствам, показана в ряде работ [3, 4, 7]. Однако эти и другие исследования касались капельных жидкостей. Вместе с тем практический интерес представляет изучение фильтрации газов (например, воздуха).

Расширение границ автомодельности процессов фильтрации на газы (воздух) позволило бы проводить

оценку гидравлических свойств пористых материалов и фильтров более простым и менее трудоемким способом — продувкой воздухом с последующим распространением результатов продувки на любой процесс фильтрации по условиям подобия.

Гидравлические свойства фильтровальных бумаг и картонов, применяемых в топливно-масляных элементах, изучались авторами путем снятия и обработки гидравлических характеристик на промышленном масле различной вязкости, а также на воздухе. Всего было испытано 13 серийно выпускаемых и опытных бумаг и картонов*, диапазон тонкости которых составляет 3—40 мкм.

Снятие гидравлических характеристик осуществлялось на безнасосной фильтрационной установке путем продавливания масла через испытуемый образец фильтрационного материала сжатым воздухом.

Схема и описание безнасосной установки приведены в [3, 4, 7]. Установка состоит из баллона со сжатым воздухом, редуктора, рессивера, сосуда с испытуемой жидкостью, приспособления для зажима образца испытуемого фильтрационного материала, манометра, мерного стакана.

Давление воздуха в рессивере при каждом опыте повышалось на 2 Н/м^2 . Перепад давления на образце в каждом опыте равен давлению до образца ($\Delta p = p_1$), так как избыточное давление после образца равно нулю ($p_2 = 0$). Пропускная способность образца определялась с помощью мерного стакана и секундомера.

Снятие гидравлической характеристики по воздуху осуществлялось с помощью установки, включающей электродвигатель с регулируемой скоростью вращения, центробежный воздуходуватель, реометр для измерения расхода воздуха и дифференциальный манометр для измерения перепада давления.

Гидравлические характеристики снимались на маслах вязкостью $2 \cdot 10^{-5}$; $3 \cdot 10^{-5}$; $10 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, а также на воздухе при температуре 20°C .

Результаты гидравлических испытаний обрабатывались в виде графических зависимостей (3.1), где скорость фильтрации определялась через замеренный рас-

* Опытные образцы были изготовлены в ВНПО бумажной промышленности (г. Ленинград).

ход масла или воздуха для заданного сечения образца $F: v = V/F$.

Гидравлические характеристики для соответствующих вязкостей прокачиваемых жидкостей и воздуха представлены на рис. 3.1—3.4. Как следует из графиков, характеристики имеют линейный характер, что указывает на выполнение закона линейной фильтрации, соответствующего закону Дарси (3.2).

Полученные характеристики использованы для определения коэффициентов проницаемости материалов по формуле

$$K = \frac{v \mu \delta}{\Delta p} \quad (3.5)$$

Расчетные значения коэффициентов проницаемости на маслах различной вязкости представлены в табл. 3.1. В табл. 3.2 можно сравнить значения K , соответствующие

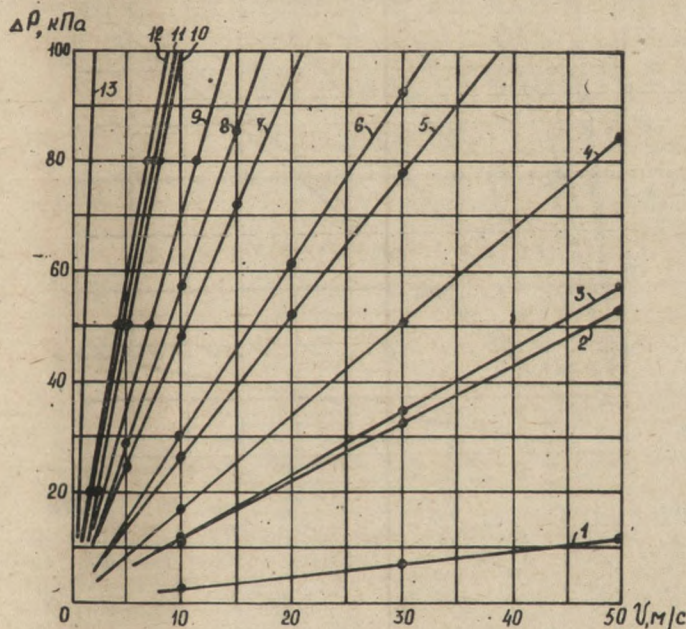


Рис. 3.1. Гидравлические характеристики фильтроматериалов при вязкости 20 сСт: 1 — ДРКБ; 2 — КФМ; 3 — БФМ; 4 — АФБ-1к (рифл.); 5 — А-2-76-3; 6 — БТ-15П; 7 — БТ-10П; 8 — А-4-76-1; 9 — БТ-5П; 10 — БТК; 11 — А-22-76; 12 — БТ; 13 — БТ-3П

щие испытаниям на масле и на воздухе. Результаты сравнения показывают, что проницаемость фильтровальных материалов, рассчитанная по маслу и по воздуху, в целом имеет хорошую сходимость, что указывает на физическое подобие фильтрационных течений капельных жидкостей (масло) и газов (воздух) в пористых материалах типа фильтрационных бумаг и картонов.

Автомодельность процессов фильтрации масел различной вязкости и воздуха через фильтрационные материалы подтверждается безразмерной критериальной зависимостью $\lambda = f(Re)$, представленной на рис. 3.5, где критерии подобия определялись по формулам (3.4).

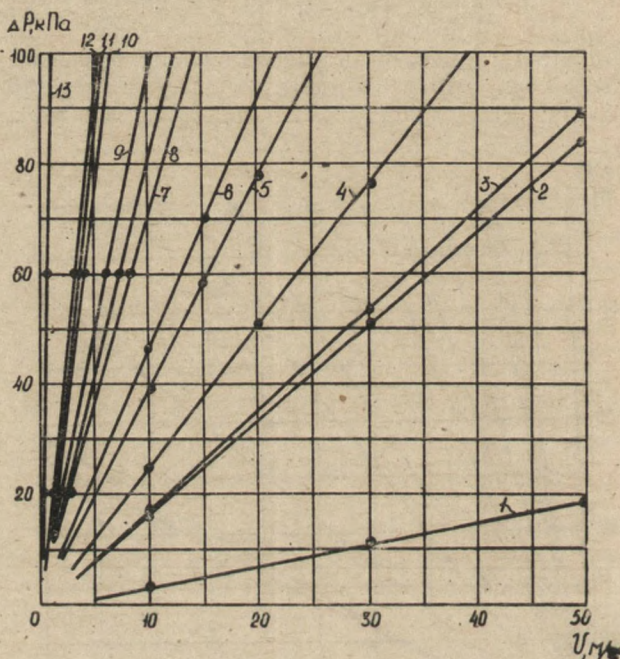


Рис. 3.2. Гидравлические характеристики фильтроматериалов при вязкости 30 сСт: 1—ДРКБ; 2—КФМ; 3—БФМ; 4—АФБ-1 (рифл.); 5—А-2-76-3; 6—БТ-15П; 7—БТ-10П; 8—А-4-76-1; 9—БТ-5П; 10—БТК; 11—А-22-76; 12—БТ; 13—БТ-3П

Этот вывод имеет большое практическое значение, дает возможность такую важную структурную характеристику фильтрационных бумаг и картонов, как коэффициент проницаемости, определять продувкой воздухом,

исключив более трудоемкие гидравлические испытания на топливах или маслах. На основе полученного вывода может быть построена единая методика оценки гидравлических свойств пористых материалов и фильтров, работающих на жидких нефтепродуктах и других жидкостях, основанная на продувке воздухом.

Таким образом, построение гидравлических характеристик фильтровальных бумаг и картонов можно производить расчетным путем. Для построения необходимо знать коэффициент проницаемости, который можно определять проливкой или продувкой. Определение коэффициента проницаемости желательно проводить для конкретных партий фильтровальных материалов, так как

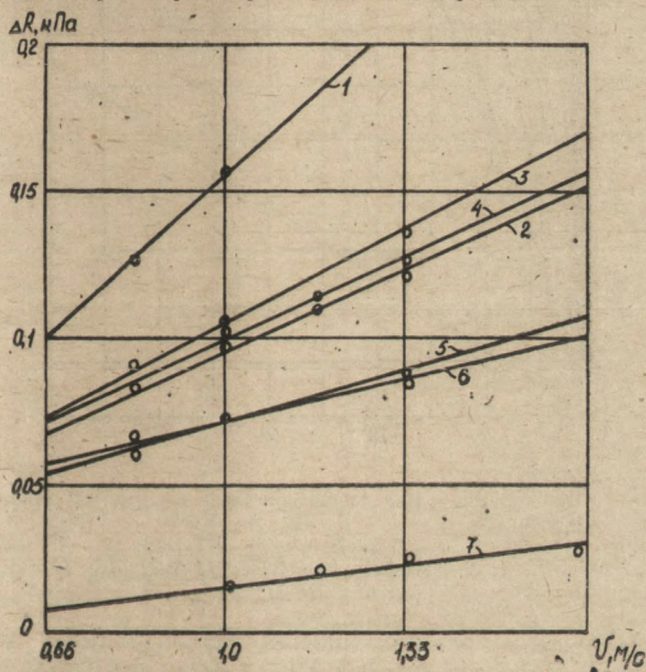


Рис. 3.3. Гидравлические характеристики фильтроматериалов при вязкости воздуха 15 сСт: 1 — БФДТ; 2 — БТ-3П; 3 — БТ; 4 — БТ-5П; 5 — БТ-10П; 6 — АФБ-1 к (без рифл.); 7 — АФБ-1 к

имеет место разброс их структурных характеристик, обусловленный факторами производственно-технологического характера.

Закон линейной фильтрации Дарси в пористых перегородках справедлив до определенной скорости фильтро-

вания, значение которой зависит от вязкости жидкости и структурной характеристики фильтровального материала. При скорости фильтрации, определяемой указанными факторами, наблюдается отклонение гидравлической характеристики от линейной зависимости, т. е. имеет место нарушение закона Дарси (рис. 3.6).

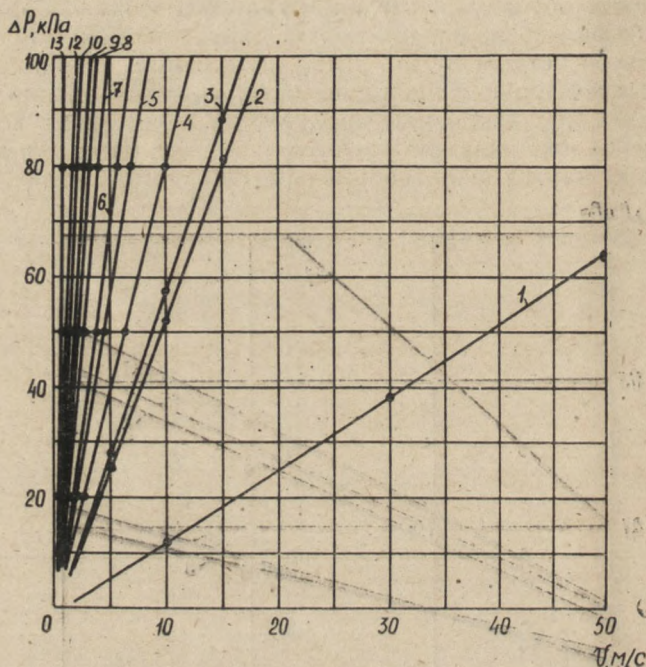


Рис. 3.4. Гидравлические характеристики фильтроматериалов при вязкости 100 сСт: 1 — ДРКБ; 2 — КФМ; 3 — БФМ; 4 — АФБ-1 К (рифл.); 5 — А-2-76-3; 6 — БТ-15П; 7 — БТ-10П; 8 — А-4-76-1; 9 — БТ-5П; 10 — БТК; 11 — А-22-76; 12 — БТ; 13 — БТ-3П

Нарушение режима линейной фильтрации (закона Дарси) переводит процесс фильтрации в область нелинейной зависимости перепада давления от скорости фильтрации, т. е. в неблагоприятную область по темпу роста гидравлического сопротивления в зависимости от скорости фильтрации. Поэтому желательно иметь критерильную оценку нарушения режима линейной фильтрации, чтобы обеспечить работу проектируемых фильтрующих элементов в более благоприятной области, соответствующей закону Дарси.

Поискам методов критериальной оценки границ применимости закона Дарси посвящены многочисленные исследования в области гидрогазодинамики различных пористых сред. Обычно поиск сводится к определению вида критериев λ и Re , позволяющего путем обработки результатов эксперимента дать однозначную оценку кри-

Таблица 3.1

Коэффициент проницаемости фильтровальных бумаг на маслах различной вязкости

Материал	Коэффициент проницаемости			$K \cdot 10^{-12}, \text{м}^2$ Среднее
	$\nu = 2 \cdot 10^{-5}$ $\text{м}^2/\text{с}$	$\nu = 3 \cdot 10^{-5}$ $\text{м}^2/\text{с}$	$\nu = 10 \cdot 10^{-5}$ $\text{м}^2/\text{с}$	
ДРКБ	47,11	46,65	41,85	45,2
КФМ	12,65	12,45	12,59	12,56
БФМ	4,85	4,8	4,62	4,76
АФБ-1к (рифл.)	4,95	4,8	4,72	4,82
А-2-76-3	2,34	2,35	2,33	2,34
БТ-15П	2,71	2,75	2,79	2,75
БТ-10П	0,98	0,96	0,96	0,97
А2-76-1	1,03	1,04	1,01	1,03
БТ-5П	0,95	1,01	0,94	0,97
БТК	0,64	0,52	0,64	0,63
А-22-76	0,67	0,67	—	0,67
БТ	0,55	0,53	0,49	0,52
БТ-3П	0,14	0,11	0,19	0,15

Таблица 3.2

Сравнение коэффициентов проницаемости фильтровальных бумаг на масле и на воздухе

Материал	Коэффициент проницаемости $K \cdot 10^{-12}, \text{м}^2$ на масле	На воздухе
АФБ-1к (рифл.)	4,82	5,2
БТ-10П	0,97	0,74
БТ-5П	0,97	0,76
БТ	0,52	0,71
БТ-3П	0,15	0,18

терию Re , обозначающую начало перехода к режиму нелинейной фильтрации. Обзор этих исследований рассмотрен ранее в [4].

Обобщению экспериментальных данных по фильтрации нефтепродуктов посвящено сравнительно немного работ [4, 6, 7, 39]. Наилучшая форма обобщения экспериментальных данных применительно к фильтровальным материалам обоснована в работах [4, 39], где в качестве критериев подобия предложено использовать следующие безразмерные комплексы:

$$\lambda^* = \frac{\Delta p \sqrt{K}}{\rho v^2 \delta} \cdot \frac{\Psi^{3/2}}{(1 - \Psi)};$$

$$Re^* = \frac{\rho v \sqrt{K}}{\mu} \cdot \frac{(1 - \Psi)}{\Psi^{3/2}},$$

где Ψ — пористость фильтровального материала.

Результаты обобщения экспериментальных данных (рис. 3.7) для пористых перегородок из различных мате-

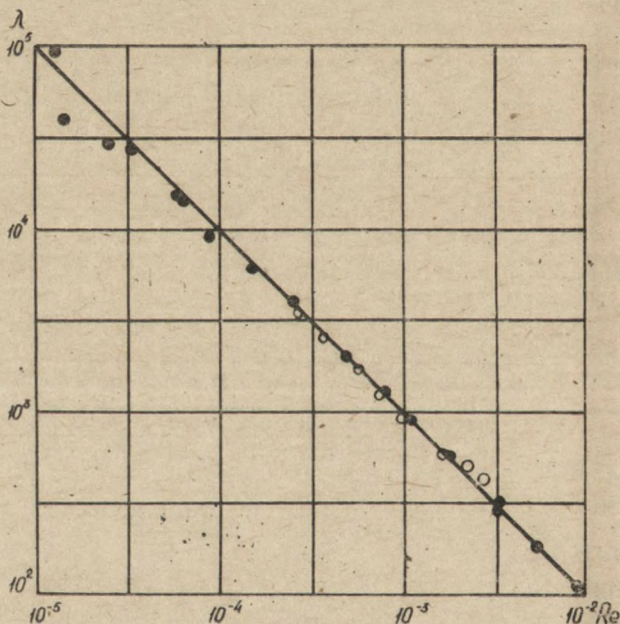


Рис. 3.5. Обобщенная гидравлическая характеристика фильтровальных бумаг

риалов (пористые металлы, бумага и картон, ткани) показывают, что максимальное значение критерия Re^* , при котором сохраняется закон линейной фильтрации, составляет $Re^* = 0,2$. При больших значениях Re^* работа фильтра нежелательна.

При проектировании фильтрующих элементов необходимо проверять выбранную поверхность фильтрации на соответствие закону линейной фильтрации по критерию Re^* .

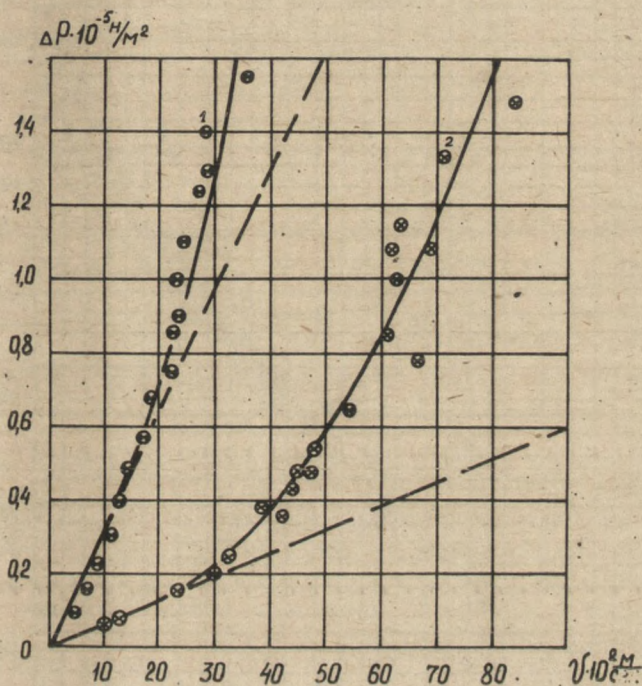
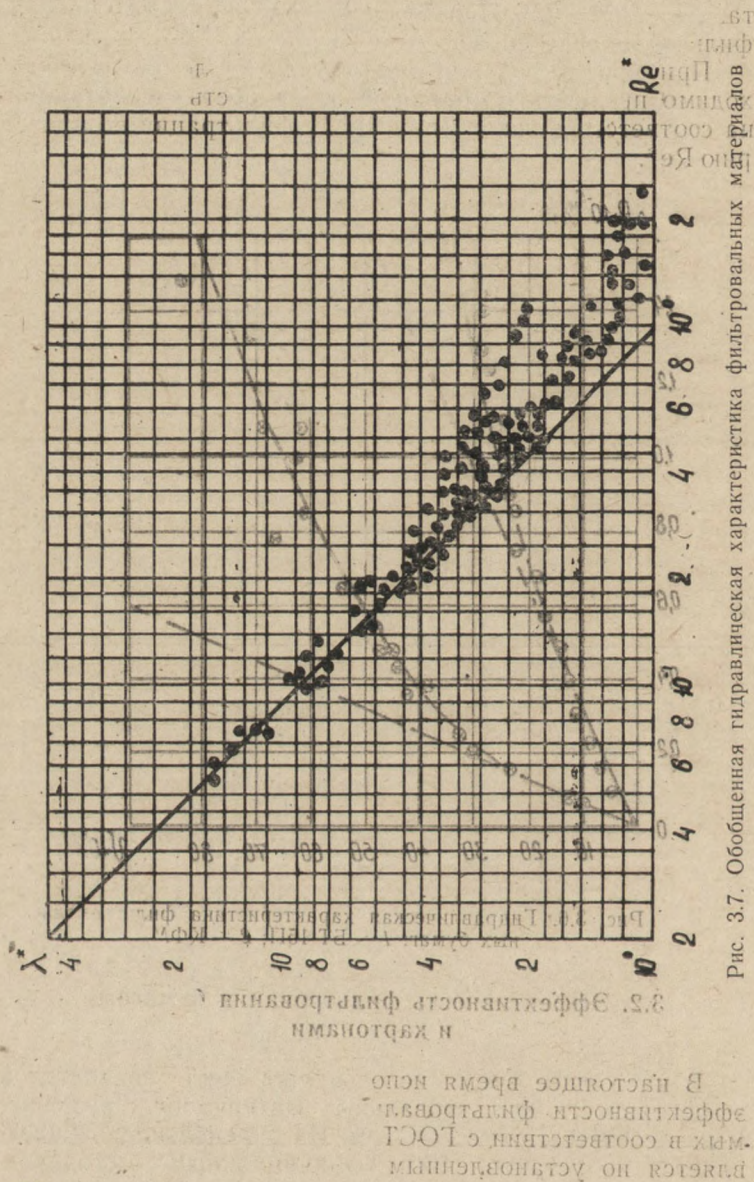


Рис. 3.6. Гидравлическая характеристика фильтровальных бумаг: 1 — БТ-15П; 2 — КФМ

3.2. Эффективность фильтрования бумагами и картонами

В настоящее время используется ряд показателей эффективности фильтровальных материалов, применяемых в соответствии с ГОСТом. Их определение осуществляется по установленным традиционным методикам



[2, 4, 6, 7]. К их числу относятся коэффициент фильтрации и фракционный коэффициент отфильтровывания.

Коэффициент полноты фильтрации φ характеризует уменьшение концентрации загрязнений в топливно-масляных суспензиях от c_0 до c' при однократном пропуске их через фильтр:

$$\varphi = \frac{c_0 - c'}{c_0} \quad (3.6)$$

Коэффициент отфильтровывания φ_i характеризует уменьшение содержания в единице объема фильтрата частиц загрязнений определенного размера при однократном пропуске суспензии через фильтр:

$$\varphi_i = \frac{N_{i0} - N'_i}{N_{i0}} \quad (3.7)$$

где N_{i0} ; N'_i — количество частиц i -го размера, содержащееся соответственно в единице объема суспензии и фильтрата.

Абсолютная тонкость фильтрации (АТФ) определяется максимальным размером частиц загрязнений, пропускаемых фильтром. Номинальная тонкость фильтрации (НТФ) определяется размером частиц, для которых коэффициент отфильтровывания φ_i составляет 0,95—0,98.

Лабораторное определение оценочных показателей эффективности проводят на предварительно отфильтрованном топливе или масле, в которое вводят искусственный загрязнитель, выбираемый в зависимости от ожидаемой тонкости фильтрации. Если испытуемый материал обеспечивает тонкость фильтрации от 1 до 5 мкм, то в качестве искусственного загрязнителя используют карбонильное железо (размер частиц 1—10 мкм). При тонкости фильтрации от 5 до 10 мкм применяют цинковую пыль (размер частиц 1—30 мкм), а для испытаний более грубых материалов — фракции стиракрила и кварцевую пыль. Гранулометрический состав частиц загрязнителя в большинстве случаев соответствует логарифмически нормальному закону распределения.

Следует заметить, что численные значения рассмотренных оценочных показателей эффективности процессов фильтрования топливно-масляных суспензий, обычно приводимые в литературе, соответствуют вполне определенным условиям испытаний, при которых они получены,

и эти условия регламентированы ГОСТом. В общем случае фильтрования значения этих показателей зависят от совокупности физико-химических свойств суспензий и фильтрующих перегородок. Кроме того, эти показатели являются переменными во времени, так как по мере забивки фильтра частицами загрязнений происходит изменение структуры перегородки гидродинамических, электростатических и других сил, обуславливающих эффекты задержки частиц в порах. Процесс задержки частиц загрязнений в топливных фильтрах является многофакторным, поэтому желательно проанализировать влияние основных из них на эффективные показатели фильтров.

В общем случае процесс фильтрования суспензий протекает в условиях взаимодействия полидисперсных частиц загрязнений с неоднородной по размеру пористой перегородкой, поэтому в зависимости от распределения частиц загрязнений и пор по размерам общий эффект отсеивания и задержки в порах определяется вероятностно-статистическими методами.

Эффективность отсеивания частиц загрязнений. Простейший механизм задержки частиц пористой перегородкой заключается в отсеивании частиц, размер которых больше или равен размеру пор. При известном (в относительных долях) распределении частиц и пор по размерам фракционная эффективность фильтра, оцениваемая коэффициентом отфильтровывания, может быть определена на основании вероятностной формулы

$$\varphi_i = 1 - \Gamma_i \sum_{j=1}^n [f_i P(i/j)], \quad (3.8)$$

где Γ_i — относительная доля частиц i -го размера; f_i — относительная доля пор i -го размера; $P(i/j)$ — вероятность прохода частиц загрязнений i -го размера по порам j -го размера.

Согласно механизму простого отсеивания вероятность прохода частиц $P(i/j)$ принимается в зависимости от соотношения размеров частиц d_r и пор d_{ni} по табл. 3.3.

При заданной функционально плотности распределения пор по размерам $P(d_n)$, а также с учетом пропорциональности потока фильтруемой жидкости диаметру по-

ры в четвертой степени коэффициент отфильтровывания частиц i -го размера определится выражением

$$\varphi_i = \frac{\int_0^{d_{ri}} d_n^4 P(d_n) dd_n}{\int_0^{\infty} d_n^4 P(d_n) dd_n} \quad (3.9)$$

Т а б л и ц а 3.3

Вероятность задержки частиц в порах
по механизму простого рассеивания

d_{ri}/d_{ni}	$p(i/j)$
1	0
1	1

Формула (3.9) также учитывает эффект простого отсеивания, обуславливающий задержание только тех частиц, размер которых равен или больше размера пор.

При известных значениях коэффициентов отфильтровывания частиц i -го размера, а также распределении по размерам можно определить коэффициент полноты фильтрации полидисперсного загрязнителя через разнородную пористую перегородку по механизму простого отсеивания:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i \Gamma_i \quad (3.10)$$

Таким образом, механизм простого отсеивания не учитывает возможности задержки более мелких (чем размер пор) частиц в порах.

Эффективность задержки частиц загрязнений в порах. При движении частиц, размер которых меньше размера пор, на них действуют различные силы, приводящие к их осаждению и задержке в порах фильтровального материала. Общая классификация основных эффектов, вызывающих осаждение и задержку частиц в порах, приведена в табл. 3.4 [4].

Весь процесс улавливания частиц в порах можно разделить на два этапа: осаждение и задержку основных частиц. Осаждение обуславливается комбинирован-

ным действием эффектов захвата (зацепления) частиц загрязнений частицами, составляющими пористую перегородку (волокнами); инерционным столкновением частицы со стенками пор, вызванным кривизной линий тока, по которым движутся частицы; гравитационным осаждением и диффузией (броуновским движением). После осаждения, на втором этапе, задержка частиц в порах обуславливается действием сил адгезии и электростатического потенциала.

Таблица 3.4

Оценка действий эффектов осаждения и задержки частиц в порах

Вид осаждения	Эффекты, вызывающие осаждение и задержку	Диапазон размеров частиц, мкм
Механический	Инерционное соударение	>1
	Прямой захват (зацепление)	>1
	Гравитационное осаждение	>1
Физико-химический	Диффузия	$<0,02$
	Электростатические силы	$<0,01$
	Силы адгезии	>1

Наиболее полно теория осаждения загрязнений применительно к волокнистым фильтрам рассмотрена в работах по механике аэрозолей. Согласно этой теории коэффициент отфильтровывания частиц определенного размера может быть рассчитан по формуле, предложенной Н. А. Фуксом [40]:

$$\varphi_i = 1 - e^{-\alpha}, \quad (3.11)$$

где α — коэффициент, определяемый соотношением:

$$\alpha = \frac{4}{\pi} E_v \frac{(1 - \Psi)}{\Psi}.$$

Здесь E_v — эффективность улавливания частиц отдельным волокном, которая является произведением эффективности осаждения на вероятность задержки под действием сил адгезии $P(z)$:

$$E_v = E_{ос} \cdot P(z). \quad (3.12)$$

Для топливно-масляных суспензий можно положить $P(z) = 1$, т. е. вероятность отрыва частицы, задержанной волокном, равна нулю.

Теоретическое определение эффективности осаждения частиц загрязнений на волокнах связано с необходимостью решения общего уравнения движения частицы в районе волокна относительно расстояния между осью сечения волокна и линией траектории движения частицы около волокна. Тогда эффективность осаждения можно определить так:

$$E_{oc} = \frac{2y}{d_b}.$$

Теория криволинейного движения частиц массой m относительно проста в области закона Стокса. Математическое описание траектории движения частицы сводится к интегрированию следующей системы уравнений:

$$m \frac{d^2 x}{d\tau^2} = -3\pi\mu d_r (V_x - v_x) + F_x; \quad (3.13)$$

$$m \frac{d^2 y}{d\tau^2} = -3\pi\mu d_r (V_y - v_y) + F_y,$$

где V — скорость частицы; v — скорость жидкости; F — силы поля (гравитационная и электростатическая).

Главная трудность решения системы уравнений (3.13) заключается в отсутствии информации о компонентах скорости фильтрационного потока v_x и v_y в районе отдельного волокна ввиду их взаимного влияния. Поэтому точные решения заменяют полуэмпирическими формулами. Часто используется формула Дэвиса, учитывающая эффекты зацепления и инерционного взаимодействия частицы с волокном как основные:

$$E_{oc} = 0,16 [N_d + (0,5 + 0,8 N_d) N_j + 0,105 N_d N_j^2], \quad (3.14)$$

где $N_d = \frac{d_r}{d_b}$ — геометрический симплекс, характеризующий эффект зацепления; $N_j = \frac{\rho_r d_r^2 v}{18\mu d_b}$ — критерий инерционного столкновения частиц с волокном.

Оценка порядка величин критериев N_d и N_j показывает, что для топливно-масляных суспензий при различных подачах топлив и масел на фильтр критерий N_j , вхо-

дящий в формулу (3.14), оказывается много меньше критерия N_d , поэтому инерционным эффектом задержки частиц загрязнений в бумагах и картонах можно пренебречь. Из этого следует, что главными эффектами, обуславливающими задержку частиц загрязнений, являются эффекты отсеивания и зацепления. Это позволяет упростить методический подход к разработке методов расчета показателей эффективности топливно-масляных фильтров.

3.3. Расчет показателей эффективности топливно-масляных фильтров

Основные показатели топливно-масляных фильтров могут быть определены расчетным путем для начальных условий работы фильтра. При этом, как показано в работе [4], структура применяемых в настоящее время тонкослойных пористых перегородок, а также характер искусственных загрязнителей топлив позволяют без большой погрешности оценить задержку загрязнений эффектом простого отсеивания. Соответственно в первом приближении расчет коэффициентов отфильтровывания можно производить по формулам (3.9) и (3.10).

Для расчета коэффициента отфильтровывания по формуле (3.9) необходимо знать плотность распределения пор фильтрующей перегородки по размерам $P(d_n)$. Анализ форм различных дифференциальных кривых распределения пор по размерам для современных фильтрующих материалов (бумага, ткани, нетканый материал), приведенных в работе [42], позволяет в качестве закона распределения пор по размерам для широкого ассортимента фильтрующих материалов принять логарифмически нормальный закон, выражаемый следующей функцией:

$$P(d_n) = \frac{1}{\lg \beta \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(\lg d_n - \lg d_0)^2}{2 \lg^2 \beta} \right], \quad (3.15)$$

где $\lg d_0$ — среднее значение распределения; $\lg \beta$ — среднеквадратичное отклонение.

Указанные параметры логарифмически нормального распределения определяются на основании экспериментальных кривых распределения пор по размерам известными методами теории вероятностей [43].

В работе [41] на основании анализа экспериментальных данных для 72 топливно-масляных фильтров из разных материалов показано, что по своей форме экспериментальные кривые коэффициентов отфильтровывания также удовлетворительно аппроксимируются логарифмически нормальным распределением. Уравнение этого распределения в интегральной форме имеет вид

$$\varphi_i = \frac{1}{\lg \beta \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\lg d_{ri}} \left[-\frac{(\lg x - \lg d_0)}{2 \lg^2 \beta} \right] dx, \quad (3.16)$$

где $\lg d_0$ — среднее значение распределения; $\lg \beta$ — среднеквадратичное отклонение.

Параметры распределения $\lg d_0$ и $\lg \beta$ в данном случае определяются по экспериментальным данным коэффициентов отфильтровывания.

Интегрирование уравнения (3.16) возможно после введения подстановки

$$t = \frac{\lg x - \lg d_0}{\lg \beta}.$$

Соответственно получаем

$$\varphi_i = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^t \exp \left[-\frac{t^2}{2} \right] dt,$$

т. е.

$$\varphi_i = \Phi \left(\frac{\lg d_{ri} - \lg d_0}{\lg \beta} \right). \quad (3.17)$$

Здесь $\Phi = \left(\frac{\lg d_{ri} - \lg d_0}{\lg \beta} \right)$ — табулированная функция [43].

Формула (3.17) позволяет определить коэффициенты отфильтровывания любой фракции частиц размером d_{ri} при известном значении параметра $\lg d_0$. В работе [41] определение этого параметра предлагается производить через экспериментально определенный общий коэффициент полноты фильтрации φ , учитывая их функциональную связь с φ_i для каждого загрязнителя с заданным распределением частиц по размерам согласно (3.10). При этом для определения другого параметра

распределения $\lg \beta$ найдено корреляционное уравнение следующего вида:

$$\lg \beta = 0,5018 - 0,1895 \lg d_0. \quad (3.18)$$

Как уже отмечалось, механизм простого просеивания, предусматривающий оценку эффективности фильтров без учета возможности задержки в порах частиц малого размера (меньше размера пор), не совсем точно отражает реальную эффективность фильтров, задерживающих частицы в порах не только за счет защемления частиц, но и за счет их осаждения под действием различных сил (диффузионные, гравитационные, электрокинетические и т. д.). Частичный учет осаждения частиц малого размера можно сделать на основании вероятностной оценки эффекта осаждения по формуле (3.3), в которой вероятность прохода частицы через пору принимается в зависимости от соотношения размеров частиц d_{ri} и пор d_{ni} по табл. 3.5 [42].

Таблица 3.5

Оценка вероятности задержки
загрязнений в порах

d_{ri}/d_{ni}	$p(i/j)$
1/3	0
1/3	1
1/3	0,75

Расчетная оценка такого показателя эффективности топливных фильтров как тонкость фильтрации обычно основана на ее корреляционных связях с максимальным или средним размером пор фильтрующего материала.

Для оценки абсолютной и номинальной тонкости фильтрации специальных бумаг и картонов В. Ф. Неволиным предлагаются следующие корреляционные соотношения между АТФ, НТФ и максимальным размером пор $d_{\max}$ [44]:

$$\text{АТФ} = 0,125 d_{\max}^{1,24}; \quad (3.19)$$

$$\text{НТФ} = 0,044 d_{\max}^{1,45}. \quad (3.20)$$

Корреляционная связь номинальной тонкости фильтрации со средним размером пор d_n показана также в работе [4]:

$$\text{НТФ} = 0,144 d_n^{1,253}. \quad (3.21)$$

В работе [42] абсолютную и номинальную тонкость фильтрации предлагается оценивать по формулам:

$$\text{АТФ} = \kappa_1 d_{\max}, \quad (3.22)$$

$$\text{НТФ} = \kappa_1 \cdot \kappa_2 d_{\max}, \quad (3.23)$$

где k_1 и k_2 — коэффициенты пропорциональности, зависящие от типа фильтрующего материала согласно табл. 3.6.

Таблица 3.6

Значения коэффициентов для оценки тонкости фильтрации

Фильтрующий материал	K_1	K_2
Ткани х/б; нетканые (хлопок + капрон)	0,335	0,685
Металлокерамика, сетки	0,602	0,667
Бумага, картон	0,358	0,555
Синтетические (сильно электризуемые)	0,145	0,5

Расчет коэффициента полноты фильтрации осуществляется по вероятностной формуле (3.10). В интегральной форме определение коэффициента полноты фильтрации осуществляется по формуле

$$\varphi = \int_0^{d_{r\max}} \varphi_{ix} dF(x), \quad (3.24)$$

где φ_{ix} — фракционный коэффициент отсева частиц одинакового размера; $F(x)$ — функция распределения частиц по размерам (дисперсный состав загрязнителя).

Для расчета φ по формуле (3.24) необходимо иметь аналитическое выражение распределения $F(x)$ и фракционный коэффициент отсева как функцию размера частиц.

Коэффициент полноты фильтрации φ функционально связан с тонкостью фильтрации. Для номинальной тонкости фильтрации (при 95% отсева частиц) для стандартных кварцевых порошков предложены следующие формулы [41]:

$$\varphi = 104,55 - 1,28(\text{НТФ}) \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned} & \text{— кварцевая пыль с } S_{уд} = 5600 \text{ см}^2/\text{г}, \\ & \quad \varphi = 103,7 - 2,07 \text{ (НТФ)} \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\text{— кварцевая пыль с } S_{уд} = 10500 \text{ см}^2/\text{г}.$$

Значение φ , определяемое по формулам (3.25) и (3.26), получают в процентах.

Рассмотренные методы расчета, основанные на экспериментальных кривых распределения пор по размерам, не обладают достаточной общностью и требуют применения трудоемких экспериментальных способов измерений. Методы аппроксимации также требуют наличия большого количества экспериментальных данных и не обладают достаточной точностью. Известные методы не позволяют оценивать эффективные показатели фильтров в связи с их гидравлическими свойствами, что исключает возможность создания фильтрующих материалов с заранее заданными свойствами, а также целенаправленного выбора материалов на стадии проектирования фильтров.

Успехи, достигнутые за последнее время в области математического описания структуры пористых тел, позволяют перейти к разработке методов расчетной оценки эффективных показателей фильтров в связи с их гидравлическими свойствами. В работе Э. И. Удлера [61] рассматривается метод, основанный на теории статистического описания и моделирования волокнистых неупорядоченных структур пористых материалов, к числу которых можно отнести фильтровальные бумаги и картоны, нетканые материалы, естественный и искусственный войлок, а также ряд других материалов, представляющих собой композицию беспорядочно уложенных волокон.

Как уже отмечалось, отделение полидисперсных частиц загрязнений топливно-масляных суспензий в пористых перегородках осуществляется под действием различных эффектов, приводящих к осаждению и задержке частиц в порах фильтрующих материалов. Общая классификация основных эффектов, вызывающих осаждение и задержку частиц (табл. 3.4), показывает, что для топливно-масляных суспензий с размерами частиц загрязнений более 1 мкм во внимание должны приниматься в основном эффекты механического характера. Причем главным из них является прямой захват, так как инерционные эффекты проявляются при фильтрации с большими скоростями маловязких жидкостей (аэрозолей). Эффекты гравитационного осаждения возможны при

глубинном фильтровании, не имеющем места в тонко-слоистых материалах, применяемых для топливно-масляных фильтров [4].

Механизм прямого захвата (отсеивания) заключается в том, что частицы загрязнений «защемляются» в перекрестьях между волокнами, при этом размер перекрестий определяет размер отделяемых частиц. Таким образом, функция распределения перекрестий по размерам является функцией распределения частиц по размерам, задерживаемых пористой перегородкой отсеиванием.

Фильтровальные бумаги можно рассматривать как композицию беспорядочно уложенных волокон. В работе [62] показано, что для неупорядоченных волокнистых структур кумулятивная функция распределения размеров свободных участков волокон в перекрестьях t может быть представлена в виде

$$P_t = \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right). \quad (3.27)$$

В этом уравнении свободный участок среднего размера λ определяется через пористость Ψ и средний диаметр волокон d_b по модели упорядоченной упаковки из выражения

$$\lambda = \frac{\pi d_b}{4(1 - \Psi)}.$$

Любая пористая перегородка толщиной δ беспорядочного волокнистого строения может рассматриваться состоящей из $n = \delta/d_b$ слоев произвольной упаковки волокон. Причем для каждого слоя справедливо распределение (3.27):

Рассмотрим следующие события: A_1 — наличие перекрестья t в первом слое упаковки; A_2 — наличие перекрестья t во втором слое; $A_1 \cdot A_2$ — наличие перекрестий t в первом и втором слое. Соответственно вероятность перекрестий t в упаковке из n слоев, вычисляемая как вероятность произведения независимых событий, составит

$$P(A_1; A_2; A_3; \dots; A_n) = P\left(\prod_{i=1}^n A_i\right) = \prod_{i=1}^n P(A_i) = P_t^n,$$

т. е.

$$P = \exp\left(-\frac{\delta \cdot t}{d_b \cdot \lambda}\right)$$

или с учетом выражения для λ

$$P = \exp \left[- \frac{\pi \delta t}{4 \lambda^2 (1 - \Psi)} \right]. \quad (3.28)$$

Ранее показано [4, 38], что величина среднего перекрестья для волокнистых структур пропорциональна среднему диаметру пор d_n , определение которого основано на капиллярных эффектах. Вводя средний диаметр поры как величину, пропорциональную λ , выражение (3.28) записываем в виде

$$P = \exp [-\beta t] = \exp \left[- \frac{\pi \delta t}{4 \alpha d_n^2 (1 - \Psi)} \right], \quad (3.29)$$

где α — коэффициент пропорциональности.

Выражение (3.29) для оценки вероятности перекрестия t в неупорядоченных волокнистых структурах можно представить так:

$$P = \exp [-\beta t],$$

$$\text{где } \beta = \frac{\alpha \delta \pi}{4 d_n^2 (1 - \Psi)}.$$

Для определения коэффициента отфильтровывания частиц загрязнений определенного i размера будем полагать, что частицы с $d_i \geq t$ задерживаются перегородкой, а частицы с $d_i < t$ пропускаются ею. Тогда коэффициент отфильтровывания, как относительная доля частиц размером d_r , задержанных перегородкой, составит

$$\varphi_i = \frac{\int_0^{d_r} P dt}{\int_0^{\infty} P dt} = \frac{\int_0^{d_r} \exp (-\beta t) dt}{\int_0^{\infty} \exp (-\beta t) dt},$$

интегрирование дает

$$\varphi_i = 1 - \exp (-ab), \quad (3.30)$$

где $b = \frac{\delta d_r}{d_n^2 (1 - \Psi)}$, a — численный коэффициент, подлежащий уточнению по экспериментальным данным.

Зависимость для φ_i , полученная обработкой экспериментальных данных по фракционным коэффициентам отфильтровывания (рис. 3.8) для фильтровальных бумаг

МФ-16 и БФДТ [41], БФМ и АБФ-1 к [6], показывает удовлетворительную корреляцию экспериментальных данных с теоретической зависимостью (3.30), которая при $a = 0,18$ дает следующее выражение для φ_i :

$$\varphi_i = 1 - \exp \left[-0,18 \frac{\delta d_i}{d_n^2 (1 - \Psi)} \right]. \quad (3.31)$$

Используя найденную ранее методом моделирования связь основных структурных характеристик волокнистых материалов [4]

$$\frac{\sqrt{K}}{d_n} = 0,0077 \Psi^{3/2},$$

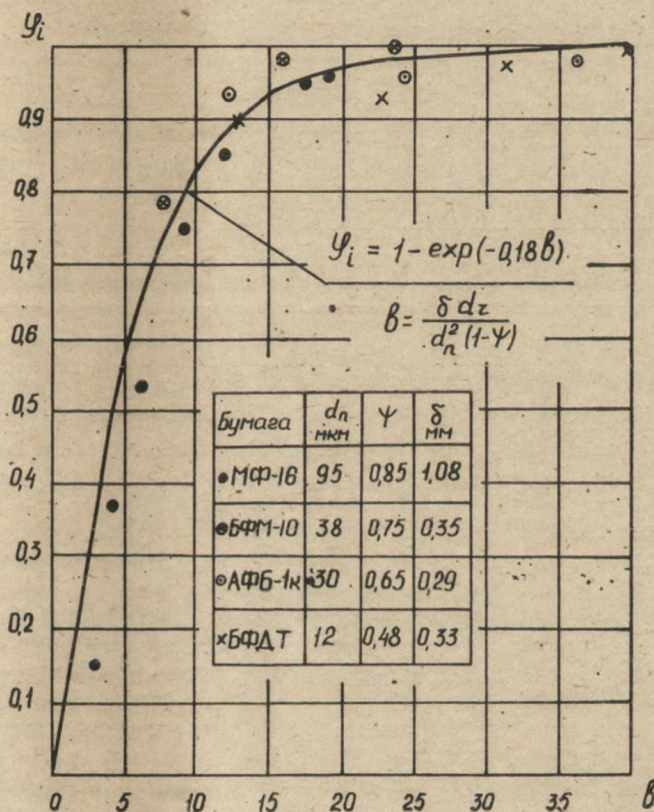


Рис. 3.8. Теоретическая и расчетная эффективность фильтрации бумагами

уравнение (3.31) можно представить в другом виде:

$$\varphi_i = 1 - \exp \left[-1,06 \cdot 10^{-3} \frac{\delta d_i \psi^3}{K(1 - \Psi)} \right], \quad (3.32)$$

где φ_i связан с коэффициентом проницаемости пористой перегородки K (определяется по закону Дарси), который характеризует гидравлические свойства фильтровальных материалов.

При $\varphi_i = 0,95$ и $\varphi_i = 0,98$ из (3.32) получаем формулы для расчета 95 и 98% номинальной тонкости фильтрации пористого материала, когда известны K, Ψ, δ :

$$\text{НТФ} = 2,825 \cdot 10^3 \cdot \frac{K(1 - \Psi)}{\delta \cdot \Psi^3}; \quad (3.33)$$

$$\text{НТФ} = 3,69 \cdot 10^3 \cdot \frac{K(1 - \Psi)}{\delta \Psi^3}. \quad (3.31)$$

Расчетные и экспериментальные значения тонкости фильтрации для некоторых типов фильтровальных бумаг представлены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Основные характеристики образцов фильтровальных бумаг

Бумага	δ , мм	$K \cdot 10^{12}$, м ²	Ψ	НТФ (95%), мкм Расчет	НТФ, мкм Эксперимент
МФ-16	1,08	51,9	0,95	33,1	35—40
БФМ-10	0,35	4,76	0,75	22,8	15—20
АФБ-1к	0,29	1,1	0,65	13,68	10—15
БФДТ	0,33	0,045	0,48	1,82	3—5

Формулы (3.33) и (3.34) дают количественную оценку известного противоречия между эффективностью фильтра и его пропускной способностью, указывая на пропорциональную зависимость между максимальным размером частиц, пропускаемых фильтром, и его гидравлическим сопротивлением.

При известных значениях фракционных коэффициентов отфильтровывания общий коэффициент полноты фильтрации, как относительная доля загрязнений, задержанных фильтром при концентрации загрязнений c_0 на

входе и c' на выходе, можно определить по формуле (3.24), а также по формуле

$$\varphi = \frac{c_0 - c'}{c_0} = \sum_1^n \varphi_i g_i, \quad (3.35)$$

где g_i — относительная массовая доля частиц i -го размера, определяемая дисперсным составом загрязнений.

Расчетные зависимости (3.33) — (3.35) для φ_i ; φ и НТФ могут служить основой создания фильтровальных материалов с заданными свойствами, а также комплексной оптимизации топливно-масляных фильтров.

3.4. Закономерности фильтрации топлив и масел в пористых перегородках

Основное назначение фильтра-очистителя, заключающееся в задержке загрязнений, имеющих в нефтяных топливах и маслах, реализуется таким образом, что происходит постепенное изменение начальных гидравлических свойств фильтра по мере забивки порового пространства осадком загрязнений.

Как уже отмечалось, одним из основных источников загрязнения нефтяных топлив и масел является пыль, которая попадает из окружающей среды различными путями. Дисперсная пыль, а также другие частицы прочих загрязнений в топливах и маслах образуют малокоцентрированную суспензию. Степень дисперсности твердой фазы топливно-масляных суспензий определяется как первоначальной дисперсностью частиц загрязнений, так и последующей возможной коагуляцией частиц под действием различных физико-химических факторов. Поэтому в целом фильтрование нефтяных топлив и масел можно рассматривать как процесс механического разделения жидкой и твердой дисперсных фаз.

Процесс фильтрования жидкостных суспензий (гидрозолей) можно разделить на две стадии. В первой осаждение частиц происходит в чистом фильтрационном материале. Для второй стадии характерны изменения структуры пористой перегородки, связанные с закупориванием пор, накоплением осадка отфильтрованных частиц и другими факторами. Структура осадка, в свою очередь, зависит от его физико-химических свойств, размеров удержанных частиц, электрокинетического потенци-

ала, возникающего на границе раздела твердой и жидкой фаз и др.

Обычно изучение закономерностей фильтрования гидрозолей сводится к определению законов изменения гидравлического сопротивления фильтра во времени по мере заполнения его порового пространства (или поверхности) частицами загрязнений.

Впервые уравнения фильтрования были выведены Льюисом и Альми [45]. Другая модификация уравнения процесса с образованием осадка предложена в работе Рутта [46]. Процессы фильтрования с закупориванием пор пористой перегородки были рассмотрены Германом и Бредди [47].

В дальнейшем теория фильтрования была значительно развита трудами Д. М. Минца [48], Ивса [49], Фрешвотера [50] и других исследователей.

Обобщение и распространение известных теорий фильтрования было сделано В. А. Жужиковым [51] применительно к процессам фильтрования промышленных суспензий.

В общем случае уравнение фильтрования в зависимости от режима подачи жидкости может быть представлено в виде [51]:

$$\frac{dR}{dq} = c_q R^b \quad (3.36)$$

— для процесса при постоянном давлении ($\Delta P = \text{const}$);

$$\frac{dR}{d\tau} = c_\tau R^b \quad (3.37)$$

— для процесса при постоянной скорости ($v = \text{const}$), где c_q и c_τ — размерные константы процессов фильтрования, зависящие от большого числа факторов, определяющих свойства фильтруемой суспензии и пористой перегородки; b — константа, определяемая видом забивки пор.

В зависимости от значения b имеют место следующие процессы фильтрования: с полным закупориванием пор ($b=2$); с постепенным закупориванием пор ($b=1,5$), с образованием осадка на поверхности фильтра ($b=0$) и процесс промежуточного типа ($b=1$).

В работе [4] отмечено, что применять к топливно-масляным суспензиям указанные виды фильтрования невозможно ввиду полидисперсности фильтруемых загряз-

нений, взаимодействующих с пористыми перегородками, имеющими поры различных размеров, задаваемых функцией распределения. Поэтому для конкретных топливно-масляных суспензий и фильтрующих перегородок вопрос о закономерностях фильтрования должен решаться вероятностно-статистическими методами, применение которых рассмотрено ранее [4].

Имеющиеся результаты экспериментальных исследований [2, 4, 6, 52] показывают, что все многообразие процессов фильтрования нефтяных топлив и масел в первом приближении может быть описано промежуточным законом фильтрации ($b=1$). Приближенная оценка темпа роста гидравлического сопротивления фильтра с помощью этого закона позволяет производить сравнение фильтров по ресурсу, что открывает возможности их оптимизации. Для расчетной оценки ресурса фильтров необходимо знать более точный закон фильтрации, соответствующий конкретным условиям фильтрования.

Для закона промежуточного типа интегрирование (3.37) дает

$$\int_{R_0}^R \frac{dR}{R} = \int_0^{\tau} c_{\tau} d\tau,$$

т. е.

$$R = R_0 \cdot \exp(c_{\tau} \cdot \tau).$$

Полагая $R = \Delta p$; $R_0 = \Delta p_0$, получаем

$$\Delta p = \Delta p_0 \cdot \exp(c_{\tau} \cdot \tau). \quad (3.38)$$

Уравнение (3.29) описывает изменение перепада давления на фильтрационной перегородке во времени. Часто ресурс фильтрации удобно характеризовать объемом отфильтрованной жидкости. В этом случае из (3.29) получаем

$$\Delta p = \Delta p_0 \cdot \exp(c_q \cdot q), \quad (3.39)$$

где q — объем фильтрата, отнесенный к единице поверхности фильтрации (удельный объем); c_q — константа фильтрования, определяемая опытным или расчетным путем.

Обобщением экспериментальных данных по фильтруемости топливных суспензий через фильтровальные бумаги и ткани методами теории подобия показано, что константа фильтрования c_q может быть представлена

функцией следующих параметров, определяющих свойства фильтрующей перегородки и суспензии [52]:

$$c_q = 0,143 \frac{c_0 \varphi}{\delta \Psi}, \quad (3.40)$$

где c_0 — процентная (массовая) концентрация загрязнителя; φ — коэффициент полноты фильтрации на данном загрязнителе; δ , Ψ — толщина и пористость фильтрующей перегородки.

С учетом (3.31) уравнение фильтрования (3.30) мож- записать в виде

$$\Delta p = \Delta p_0 \exp\left(-0,143 \frac{c_0 \varphi q}{\delta \Psi}\right). \quad (3.41)$$

Это уравнение может служить основой для сравнительной оценки фильтрующих перегородок по темпу роста гидравлического сопротивления, а также для оптимизации фильтрующих элементов по ресурсу работы.

ГЛАВА IV

МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ ФИЛЬТРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

4.1. Общая характеристика и сравнение элементов по типу фильтрующей шторы

Фильтрующая штора является главным конструктивным элементом поверхностных топливно-масляных фильтров из бумаги и картона. Поэтому форма шторы, способ ее укладки, степень заполнения объема фильтра материалом шторы, правильный выбор самого материала являются важными факторами, от которых в большой степени зависит конструктивное совершенство фильтрующих элементов с точки зрения их эффективности, надежности и ресурса работы.

В настоящее время отечественные и зарубежные фильтрующие элементы, предназначенные для очистки нефтяных топлив, масел и специальных жидкостей, оснащаются бумажными и картонными шторами различной формы укладки. Главными из них являются (рис. 4.1) шторы: а) в форме многолучевой звезды (звездообразная); б) сложенная «гармошкой» (складчатая); в) уложенная в виде винтовой складки (винтовая складчатая); г) выполненная по типу винтовой с дополнительными складками, уложенными по спирали (спирально-складчатая); д) в виде набора фильтрующих дисков (пакетированная); е) улиткообразная, уложенная по спирали Архимеда (спиральная).

Известны и другие виды фильтрующих штор, по разным причинам не нашедшие широкого применения на практике. Независимо от сложности конфигурации фильтрующих штор для всех их характерно то, что требуемое увеличение поверхности фильтрации достигается за счет гофрирования тонкослойного материала (бумаги или картона). По отношению к оси цилиндрического корпуса фильтрующего элемента гофрирование может быть продольным (рис. 4.1, а) либо поперечным (рис. 4.1, в—е).

Для характеристики степени увеличения поверхности за счет гофрирования и степени заполнения объема фильтрующего элемента шторой удобно пользоваться коэффициентами гофрирования и плотности шторы.

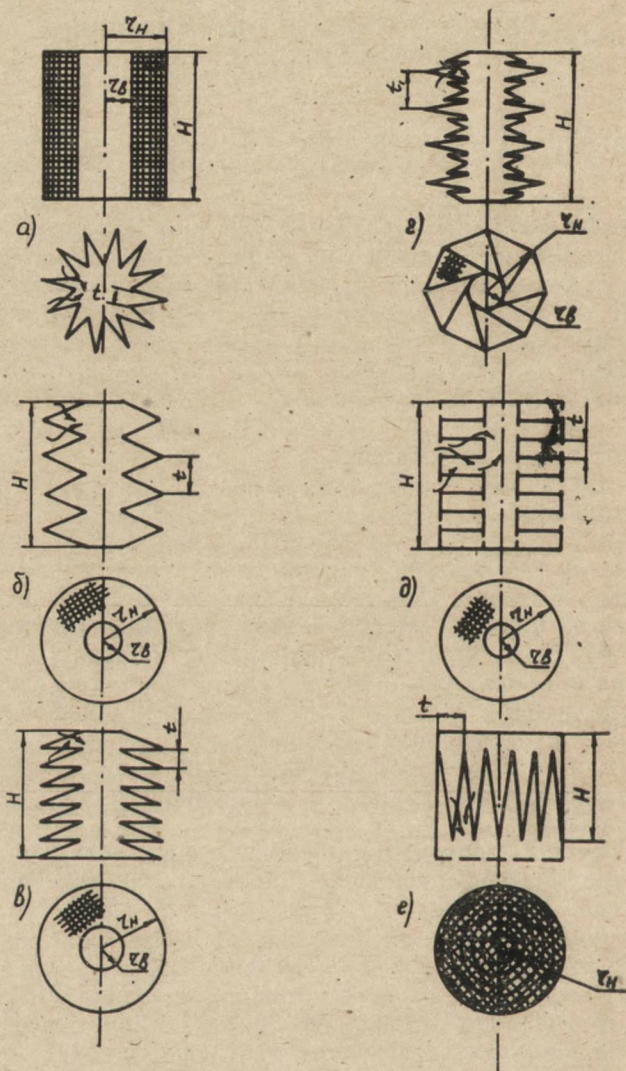


Рис. 4.1. Схемы укладки фильтрующих штор

Коэффициент гофрирования K_F представляет собой отношение общей поверхности фильтрующей шторы F_Φ к ее цилиндрической огибающей поверхности F_0 :

$$K_F = \frac{F_\Phi}{F_0}. \quad (4.1)$$

Коэффициент плотности шторы представляется отношением фактического числа гофр (шагов) шторы n к максимально возможному при плотной укладке $n_{\max}$

$$\varepsilon = \frac{n}{n_{\max}}. \quad (4.2)$$

Этот коэффициент характеризует степень заполнения объема фильтра. Приближенная оценка поверхности фильтрации для звездообразной шторы (рис. 4.1, а) дает

$$F_\Phi = 2(r_n - r_v) \cdot \frac{2\pi r_v}{t} \cdot H = \frac{4\pi(r_n \cdot r_n - r_v)H}{t}, \quad (4.3)$$

где t — шаг гофрирования.

Для фильтрующих штор типа б — д (рис. 4.1) получаем

$$F_\Phi = \frac{2\pi(r_n - r_v)H}{t}. \quad (4.4)$$

Для спиральной шторы (рис. 4.1, е) уравнение образующей в полярных координатах имеет вид

$$r = a\varphi,$$

где φ — угловая координата.

При $\varphi = 2\pi$ $r = h$, тогда $a = \frac{h}{2\pi}$, т. е. $\varphi = \frac{2\pi r}{h}$.

Для спирали большой длины

$$L \rightarrow \frac{a\varphi^2}{2} = \frac{\pi r_n^2}{t},$$

откуда фильтрующая поверхность спиральной шторы составит

$$F_\Phi = 2LH = \frac{2\pi r_n^2 H}{t}. \quad (4.5)$$

Оценочные зависимости для коэффициентов K_F и ε штор различной конфигурации представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Основные показатели бумажных фильтрующих элементов

Тип фильтрующей шторы	Поверхность фильтрации, F_Φ	Коэффициент гофрирования, K	Коэффициент плотности шторы, ε
Звездобразная (а)	$F_\Phi = \frac{4\pi (r_H^2 \cdot r_B - r_B^2) H}{t}$	$K_F = \frac{2 (r_H^2 \cdot r_B - r_B^2)}{t \cdot r_H}$	$\varepsilon = \frac{n\delta}{\pi r_B}$
Складчатая (гармошечная) (б)	$F_\Phi = \frac{2\pi (r_H^2 - r_B^2)}{t}$	$K_F = \frac{(r_H^2 - r_B^2)}{t r_H}$	$\varepsilon = \frac{2n\delta}{H}$
Винтовая складчатая (в)	$F_\Phi = \frac{2\pi (r_H^2 - r_B^2) H}{t}$	$K_F = \frac{(r_H^2 - r_B^2)^2}{t \cdot r_H}$	$\varepsilon = \frac{2n\delta}{H}$
Спирально-складчатая (г)	$F_\Phi = \frac{2\pi (r_H^2 - r_B^2)}{t \cdot \frac{t_1}{i\delta} ; i = (4-12)}$	$K_F = \frac{(r_H^2 - r_B^2)}{t \cdot r_H}$	$\varepsilon = \frac{nt_1}{H} ; t_1 = i\delta$
Пакетированная (д)	$F_\Phi = \frac{2\pi (r_H^2 - r_B^2) H}{t}$	$K_F = \frac{(r_H^2 - r_B^2)}{t r_H}$	$\varepsilon = \frac{2n\delta}{H}$
Спиральная (е)	$F_\Phi = \frac{2\pi r_H^2 H}{t}$	$K_F = \frac{r_H}{t}$	$\varepsilon = \frac{2n\delta}{r_H}$

Эти зависимости дают приближенную оценку для K_F и ε . Более точные методы расчета геометрических параметров фильтрующих штор можно найти в специальных работах [4, 5, 53].

Зависимости для K_F , приведенные в табл. 4.1, дают возможность сравнить различные типы штор по эффективности использования объема фильтрующих элементов. Сравнение проведем при соотношении наружного и внутреннего радиусов штор, равном двум: $R = r_n/r_b = 2$. Как будет показано ниже, это соотношение позволяет получить максимальные K_F для звездообразной шторы.

При $r_b = \frac{r_n}{2}$ из табл. 4.1 получаем

для звездообразной шторы:

$$F_F = \frac{1}{2} \frac{r_n}{t}; \quad (4.6)$$

для складчатых и пакетированных:

$$K_F = \frac{3}{4} \frac{r_n}{t}; \quad (4.7)$$

для спиральных:

$$K_F = \frac{r_n}{t}. \quad (4.8)$$

Из (4.6) — (4.8) следует, что при одинаковом шаге гофрирования наибольшее увеличение поверхности фильтрующего материала одной и той же толщины достигается при спиральной укладке. Складчатые и пакетированные шторы позволяют разместить в 1,5 раза большую поверхность в сравнении со звездообразными. Следует отметить, что поверхность фильтрующей шторы однозначно не определяет ресурс фильтра. Стремление разработчиков максимально развивать поверхность в пределах заданного объема с целью увеличения ресурса фильтрующих элементов не всегда является оправданным и может дать обратный эффект. Связано это с тем, что общее начальное гидравлическое сопротивление гофрированных бумажных штор Δp в основном складывается из сопротивления трения в каналах гофр $\Delta p_{тр}$ и сопротивления фильтрации в пористом материале $\Delta p_{ф}$:

$$\Delta p = \Delta p_{тр} + \Delta p_{ф}. \quad (4.9)$$

При увеличении поверхности фильтрующей шторы в рамках одного и того же объема растет составляющая $\Delta p_{\text{тр}}$, но уменьшается $\Delta p_{\text{ф}}$, с уменьшением поверхности — наоборот. Для каждой шторы существует оптимальная степень заполнения объема ϵ , дающая минимальное значение Δp . Неразумное увеличение поверхности шторы может привести к столь высокому начальному Δp , что ресурс работы фильтрующего элемента до выбраковочного Δp будет минимальным.

Существование оптимальной степени заполнения объема гофрированных фильтров подтверждает результаты авторов работы [54] по испытанию спирально-складчатого фильтрующего элемента из бумаги БФДТ на дизельном топливе. Как следует из рис. 4.2, наибольшая пропускная способность при $\Delta p = 0,1 \text{ кг/см}^2 = \text{const}$ достигается при коэффициенте плотности шторы $\epsilon = 0,5$.

Влияние формы укладки фильтрованных бумаг и картонов на гидравлические свойства фильтра желатина

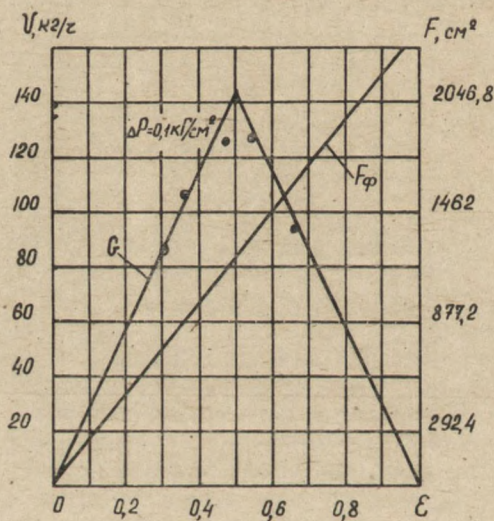


Рис. 4.2. Зависимость пропускной способности и площади поверхности от коэффициента заполнения объема для спирально-складчатой шторы бумаги БФДТ

тельно проводить при одинаковой поверхности и объеме укладки. Такое сравнение показано на рис. 4.3, где приведены гидравлические характеристики фильтрующих элементов с различными фильтрующими шторами из бумаги БФМ поверхностью $F_{\phi} = 0,26 \text{ м}^2$, снятые авторами на индустриальном масле $\nu = 30 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Рассматриваемые шторы уложены в одинаковом цилиндрическом объеме со следующими размерами: $r_{\text{н}} = 67 \text{ мм}$, $r_{\text{б}} = 12,5 \text{ мм}$, $H = 153 \text{ мм}$.

Судя по гидравлическим характеристикам, худшими гидравлическими свойствами при одинаковой поверхности фильтрации обладает спирально-складчатая штора, лучшими — звездообразная с дренажным сетчатым под-

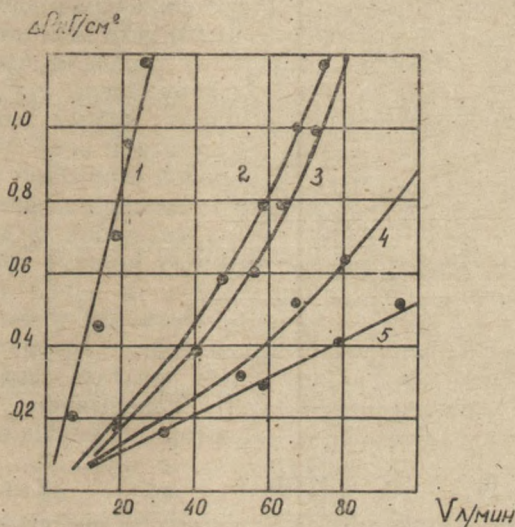


Рис. 4.3. Сравнение фильтрующих штор по гидравлическому сопротивлению: 1 — спирально-складчатая; 2 — звездообразная без прокладок; 3 — винтообразная; 4 — звездообразная с гребенчатыми прокладками; 5 — звездообразная с подслоной сеткой. Зависимость $K_{\text{сн}}$ от наружного диаметра шторы

слоем, стабилизирующим гофр. Звездообразная штора без средств стабилизации гофра и винтообразная имеют примерно одинаковые гидравлические свойства.

Гидравлические свойства гофрированных фильтрующих штор удобно сравнивать по коэффициенту совершенства конструкции [53]:

$$K_{\text{ск}} = \frac{V}{v_{\text{ф}} F_{\text{ф}}}, \quad (4.10)$$

где V — фактическая пропускная способность шторы при условном перепаде давления Δp ; $v_{\text{ф}}$ — удельная пропускная способность (скорость фильтрации по закону Дарси) через поверхность $F_{\text{ф}}$ при этом перепаде давления.

Строение критерия $K_{\text{ск}}$ таково, что он позволяет учесть все потери пропускной способности шторы — суммарно одной величиной безотносительно к удельной пропускной способности каждого фильтровального материала. Числитель выражения (4.10) есть действительный расход жидкости через штору. Он определяется по гидравлической характеристике. Знаменатель $v_{\text{ф}} F_{\text{ф}}$ — тоже расход, но теоретический, которого можно достигнуть в идеальном случае, т. е. при отсутствии всех других потерь напора, кроме потерь в поровой структуре материала при наибольшей возможной площади фильтрации $F_{\text{ф}}$. Таким образом, $K_{\text{ск}}$ представляет собой ту долю теоретического расхода $v_{\text{ф}} F_{\text{ф}}$, которую может пропустить реальная штора при данном условном перепаде давления. Согласно [53] принимается $\Delta p = 0,1 \text{ кг/см}^2$.

По данным испытаний, проведенных авторами (рис. 4.3) для различных конструкций фильтрующих штор, расчетные значения (табл. 4.2) показывают большее совершенство звездообразных штор, оснащенных под-

Таблица 4.2

Значения коэффициентов совершенства конструкций
для различных типов фильтрующих штор

Тип фильтрующей шторы	$V \cdot 10^{-3}, \text{ м}^3/\text{с}$	$K_{\text{ск}}$
Спирально-складчатая	0,23	0,048
Винтовая	0,89	0,133
Звездообразная	0,69	0,109
Звездообразная с картонными прокладками	1,18	0,186
Звездообразная с подслоем сеткой	1,55	0,247

слоистой, сеткой и гребенчатыми картонными прокладками, исключаящими слипание гофр [54]. Винтовая и спирально-складчатая шторы обладают худшими гидравлическими свойствами.

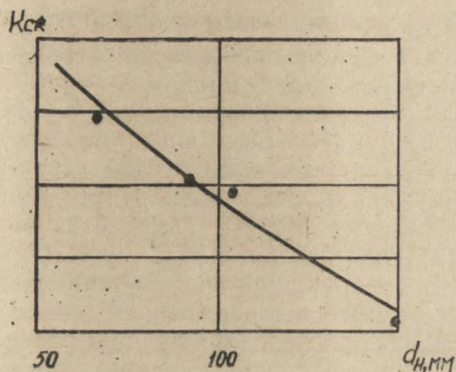


Рис. 4.4. Зависимость $K_{ск}$ от наружного диаметра шторы

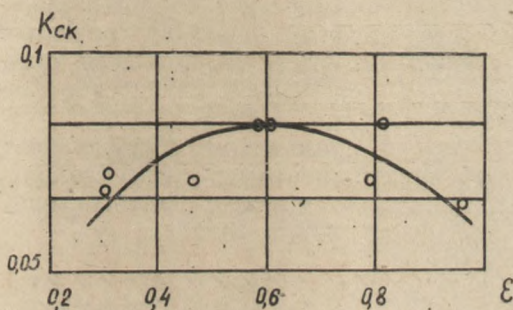


Рис. 4.5. Зависимость $K_{ск}$ от ϵ

Коэффициент совершенства конструкции функционально зависит от размеров [53] (рис. 4.4) и плотности фильтрующей шторы. По-видимому, для каждого типа шторы эта зависимость имеет конкретный вид. Для любой шторы существует область оптимальных значений ϵ , обеспечивающих наилучшие гидравлические свойства. Для спирально-складчатой шторы экстремальная зависимость $K_{ск} = f(\epsilon)$ показана на рис. 4.5. Экстремум $K_{ск}$ при $R = r_n/r_b = 5$ соответствует $\epsilon = 0.6$ [53]. При линейной зависимости общего сопротивления фильтрующей шторы от вязкости топлива или масла $K_{ск}$ должен однозначно зависеть от R и ϵ . Поэтому для фильтрующих штор с линейной (или близкой к ней) гидравлической

характеристикой эта зависимость, найденная экспериментально, может быть использована для гидравлического расчета и оптимизации фильтрующих штор.

Ресурс работы фильтрующих элементов до выбраковочного гидравлического сопротивления зависит от начальных гидравлических свойств, фактической поверхности фильтрации F_f и от закономерности фильтрации конкретной топливно-масляной суспензии.

При одинаковой закономерности фильтрации в поверхностных фильтрах из бумаги и картона противодействуют два фактора: плотность укладки шторы (характеризуется коэффициентом ϵ) и поверхность фильтрации (характеризуется коэффициентом K_F). Первый из них уменьшает ресурс, а второй — увеличивает. Очевидно, исходя из экономических соображений предпочтение должно быть отдано фильтрующей шторе, которая при минимальной плотности укладки имеет наибольший ресурс в рамках одного и того же объема фильтрующего элемента. Однако предпочтительный выбор конфигурации шторы по этому принципу является многофакторной и сложной задачей. Поэтому в настоящее время на практике выбор типа фильтрующей шторы осуществляется исходя из конструктивных или технологических соображений.

Практика разработки и применения фильтрующих элементов из бумаги и картона показывает, что наибольшее распространение нашли элементы с фильтрующей шторой звездообразного типа [4, 8, 9, 10, 55].

4.2. Гидравлический расчет фильтрующих элементов

Как уже отмечалось, начальные гидравлические свойства являются определяющими для оценки начального гидравлического сопротивления и ресурса фильтрующих элементов. Расчетная оценка сопротивления необходима для целей их проектирования и оптимизации.

Общее гидравлическое сопротивление элементов из бумаги и картона складывается из сопротивления в гофрированной шторе и сопротивлений в элементах конструктивной оснастки.

Теоретический анализ гидродинамики в гофрированных фильтрующих шторах. Как показано в п. 4.1, основу любой фильтрующей што-

ры составляет гофрированная поверхность различной конфигурации. Простой моделью любой гофрированной поверхности является прямой гофр, показанный на рис. 4.6. Анализируя движение жидкости в прямом гофре, можно затем перейти к конкретным шторам звездообразного и складчатого типа [56].

Рассмотрим ламинарное течение жидкости в элементе прямого пористого гофра согласно схеме на рис. 4.6. Для течения без трения (т. е. без учета вязкости) ком-

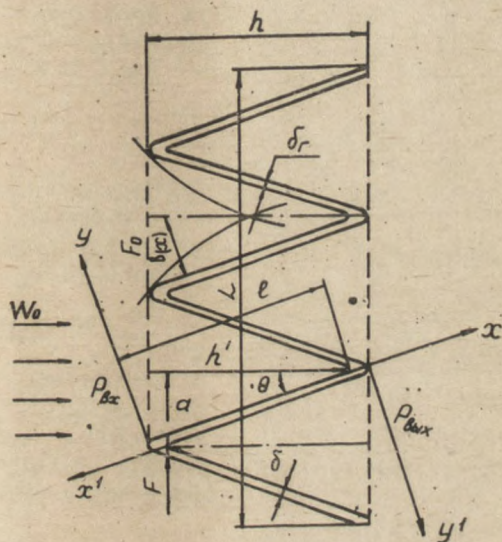


Рис. 4.6. Схема прямого гофра

поненты вектора скорости жидкости в координатах x — y определяются следующим образом:

$$u_0 = W \cos \theta; \quad (4.11)$$

$$v_0 = W \sin \theta,$$

где W — средняя расходная скорость в элементе гофра, определяемая выражением

$$W = \frac{V}{F_0 - F'}. \quad (4.12)$$

Здесь V — расход жидкости через перегородку; F_0 — общая нормальная к потоку поверхность фильтрации; F' — нормальное к потоку сечение, образованное вершинами гофра, загромождающими поток.

С учетом геометрических соотношений (см. рис. 4.6) выражение (4.12) приводится к виду

$$W = \frac{W_0}{1 - \frac{F'}{F_0}} \approx \frac{W_0}{1 - \frac{2n\delta}{L}}, \quad (4.13)$$

где $W_0 = \frac{V}{F_0}$ — расходная скорость через поверхность F_0 ; n — число шагов гофра на длине L .

Введем коэффициент плотности гофра, представляющий собой отношение объема, занятого фильтрационным материалом в шторе, к полному объему:

$$\varepsilon = \frac{2n\delta(l + 2\delta)}{L \cdot h} = \frac{2n\delta(l + 2\delta)}{2n_{\max}\delta(l + 2\delta)} = \frac{n}{n_{\max}}, \quad (4.14)$$

где $n_{\max}$ — максимальное число шагов при плотной укладке.

С учетом (4.14) при $l \gg \delta$ выражение (4.13) приводится к виду

$$W = \frac{W_0}{\left(1 - \varepsilon \frac{h}{l}\right)}. \quad (4.15)$$

Движение вязкой жидкости в элементе гофра (см. рис. 4.6) является двухмерным и описывается в координатах x — y следующей системой дифференциальных уравнений [57]:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u; \quad (4.16)$$

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v; \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4.18)$$

с граничными условиями:

$$\begin{aligned} y = 0: u = 0; v = -v_\phi(x) = W \sin \theta; \\ y = b(x): u = W \cos \theta; v = -W \sin \theta. \end{aligned} \quad (4.19)$$

С целью получения высокой грязеемкости поверхность фильтрации реальных гофрированных фильтров выполняется достаточно развитой. Поэтому далее рас-

смачивается случай движения жидкости в тесном гофре, для которого следует положить (см. рис. 4.6):

$$b \ll l; \frac{b}{l} \ll 1, 0.$$

Пусть W — характерная скорость течения; l — характерный размер. Из уравнения (4.18) следует, что для рассматриваемого случая порядок величин составляет

$$\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial u}{\partial x} = \left(\frac{W}{l}\right). \quad (4.20)$$

Интегрируя почленно (4.20) от y до $y = b$, находим

$$v = \left(W \frac{b}{l}\right), \text{ т. е. } v \ll u.$$

Оценим члены в уравнениях (4.16) — (4.17). В рассматриваемом случае производная произвольной функции f по x намного меньше соответствующей производной по y . Действительно

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \left(\frac{f}{l}\right); \frac{\partial f}{\partial y} = \left(\frac{f}{b}\right),$$

следовательно, члены уравнений (4.16) и (4.17) имеют такой порядок:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x}; \rho v \frac{\partial u}{\partial y}; \frac{\partial p}{\partial x} \rightarrow \left(\rho \frac{W^2 b}{l^2}\right) = \left(\rho \frac{W^2}{l} \cdot \frac{b}{l}\right);$$

$$\mu \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \rightarrow \left(\mu \frac{W}{b^2} \cdot \frac{b}{l}\right);$$

$$\mu \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \rightarrow \left(\mu \frac{W}{l} \cdot \frac{b}{l}\right).$$

Отбрасывая в уравнении (4.17) члены второго порядка малости, получаем

$$\frac{\partial p}{\partial y} \rightarrow \left(\rho \frac{W^2}{l} \cdot \frac{b}{l}\right),$$

т. е. градиент давления $\frac{\partial p}{\partial y}$ является малой величиной, и изменением давления поперек слоя можно пренебречь.

Сравнивая (4.16) и (4.17), видим, что все члены первого и второго уравнения системы (4.16) — (4.17) имеют

разный порядок и, соответственно, всеми членами уравнения (4.17) можно пренебречь.

Получаем уравнения в форме уравнения Прандтля [56]:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}; \quad (4.21)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (4.22)$$

Учитывая, что $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$ и также $\rho v \frac{\partial u}{\partial y} \ll \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$, получаем одномерное уравнение, описывающее движение вязкой жидкости в гофре (см. рис. 4.6) при $\frac{b}{l} \ll 1, 0$:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \frac{d^2 u}{dy^2} = 0 \quad (4.23)$$

с граничными условиями:

$$\begin{aligned} y = 0 : u &= 0 \\ y = b(x) : u &= u_0 = W \cos \theta, \end{aligned} \quad (4.24)$$

где u — скорость жидкости в направлении x ; p — давление; ρ ; ν — плотность жидкости и кинематическая вязкость.

Введением масштабов уравнение (4.23) и граничные условия (4.24) приводятся к виду

$$\text{Re}' \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} = \frac{d^2 \bar{u}}{d\bar{y}^2}; \quad (4.25)$$

$$\bar{y} = 0 : \bar{u} = 0;$$

$$\bar{y} = \bar{b}(x) : \bar{u} = \cos \theta, \quad (4.26)$$

где $\bar{x} = \frac{x}{l}$; $\bar{y} = \frac{y}{l}$; $\bar{b}(x) = \frac{b(x)}{l}$;

$$\bar{p} = \frac{p}{\rho W^2}; \quad \bar{u} = \frac{u}{W}; \quad \text{Re}' = \frac{Wl}{\nu}.$$

Обозначим $\frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} = p'$ и проинтегрируем уравнение (4.25):

$$\bar{u} = p' \operatorname{Re} \bar{y}^2 + c_1 \bar{y} + c_2. \quad (4.27)$$

Постоянные интегрирования определяются из граничных условий (4.26):

$$c_1 = \frac{\cos \theta}{\bar{b}(x)} - p' \operatorname{Re}' \bar{b}(x); \quad c_2 = 0. \quad (4.28)$$

С учетом (4.28) выражение для скорости (4.27) принимает вид

$$\bar{u} = p' \operatorname{Re}' \bar{y}^2 + \left[\frac{\cos \theta}{\bar{b}(x)} - p' \operatorname{Re}' \bar{b}(x) \right] \bar{y}. \quad (4.29)$$

Определим средний расход жидкости через сечение высотой $\bar{b}(x)$ на ширине гофра, равном 1,0 (рис. 4.6):

$$\bar{V} = \int_0^{\bar{b}(x)} \bar{u} d\bar{y} = \frac{1}{6} \operatorname{Re}' p' \bar{b}^3(x) + \frac{1}{2} \bar{b}(x) \cos \theta. \quad (4.30)$$

Это же количество жидкости проходит через фильтрующую перегородку со средней скоростью $v = \frac{v_0}{W} = \sin \theta$, т. е.

$$\bar{V} = (1 - \bar{x}) \sin \theta. \quad (4.31)$$

Приравнявая (4.30) и (4.31), получаем уравнение для определения градиента давления в канале гофра:

$$p' = \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} = - \frac{6(1 - \bar{x}) \sin \theta}{\operatorname{Re}' \bar{b}^3(x)} + \frac{3 \cos \theta}{\operatorname{Re}' \bar{b}^2(x)}. \quad (4.32)$$

Интегрирование уравнения (4.32) дает распределение давления

$$p'(x) = p'_{\text{вх}} - \frac{6 \sin \theta}{\operatorname{Re}' \bar{b}^3(x)} \left(\bar{x} - \frac{\bar{x}^2}{2} \right) + \frac{3 \cos \theta}{\operatorname{Re}' \bar{b}^2(x)} \bar{x}. \quad (4.33)$$

На основании (4.33) для заданной формы канала гофра $\bar{b}(x) = (1 - \bar{x}) \operatorname{tg} \theta$ определим осредненный пе-

репад давления по длине канала при среднем значении $b(x) = \frac{1}{2} \operatorname{tg} \theta$:

$$\begin{aligned} \nabla \bar{p}_{\text{тр}} &= \int_0^1 (\bar{p}_{\text{вх}} - \bar{p}(x)) d\bar{x} = \frac{16 \sin \theta}{\operatorname{Re}' \operatorname{tg}^3 \theta} - \\ &- \frac{6 \sin \theta}{\operatorname{Re}' \operatorname{tg}^3 \theta} = \frac{10 \sin \theta}{\operatorname{Re}' \operatorname{tg}^3 \theta}. \end{aligned} \quad (4.34)$$

Выражение (4.34) представляет собой гидравлическое сопротивление трения в канале гофра со стороны входа жидкости (координаты $x-y$). Из условия симметрии течения следует, что равное этому сопротивление будет оказано и со стороны выхода (координаты $x'-y'$).

Сопротивление фильтрации через пористую перегородку толщиной δ определяется законом Дарси:

$$\Delta p_{\phi} = \frac{v_{\phi} \mu \delta}{K} = \frac{W \mu \delta \sin \theta}{K}$$

или

$$\Delta \bar{p}_{\phi} = \frac{\Delta p_{\phi}}{\rho W^2} = \frac{l \delta \sin \theta}{\operatorname{Re}' K}, \quad (4.35)$$

где K — коэффициент проницаемости фильтрующей перегородки.

Полное сопротивление движению жидкости через прямой гофр с фильтрованием определяется выражением:

$$\Delta \bar{p} = 2 \Delta \bar{p}_{\text{тр}} + \Delta \bar{p}_{\phi},$$

т. е.

$$\Delta \bar{p} = \sin \theta \left[\left(\frac{20}{\operatorname{Re}' \operatorname{tg}^3 \theta} + \frac{l \delta}{\operatorname{Re}' K} \right) \right]. \quad (4.36)$$

При движении жидкости в шторе звездообразного типа (рис. 4.7) закономерности течения в отдельных элементах гофра принимаются аналогичными рассмотренным выше. Необходимо только учесть, что средняя расходная скорость течения здесь в отличие от прямого гофра меняется с изменением радиуса:

$$W r = W \frac{r_n}{r}, \quad (4.37)$$

где r — текущий радиус.

Воспользуемся средним значением радиальной скорости:

$$W_{cp} = \frac{1}{r_H - r_B} \int_{r_B}^{r_H} W_r dr = W \frac{\ln \frac{r_H}{r_B}}{\left(1 - \frac{r_B}{r_H}\right)} \quad (4.38)$$

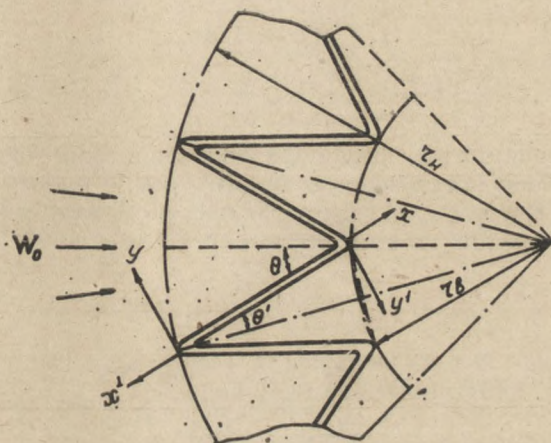


Рис. 4.7. Схема звездообразного гофра

Из схемы на рис. 4.7 следует также, что теснота звездообразного гофра, определяемая углами θ и θ' , со стороны входа и выхода жидкости различна. Поэтому выражение (4.36) для гидравлического сопротивления звездообразной гофрированной перегородки с фильтрацией следует представить в виде

$$\Delta \bar{p} = \Delta \bar{p}_{тр} + \Delta \bar{p}'_{тр} + \Delta \bar{p}_{ф}$$

или

$$\Delta \bar{p} = \frac{\ln \frac{r_H}{r_B}}{\left(1 - \frac{r_B}{r_H}\right)} \left(\frac{10 \sin \theta}{Re' \operatorname{tg}^3 \theta} + \frac{10 \sin \theta'}{Re' \operatorname{tg}^3 \theta'} + \frac{\sin \theta}{Re'} \cdot \frac{l \delta}{K} \right) \quad (4.39)$$

Из геометрических соотношений (рис. 4.7) находим

$$\operatorname{tg} \theta \approx \frac{a}{h'} \approx \frac{L - 2n\delta}{2n(h - 2\delta)},$$

или с учетом (4.14) при $l \gg \delta$; $h \gg \delta$, а также $\frac{h}{l} \rightarrow 1,0$

$$\operatorname{tg} \theta \approx \frac{\left(\frac{l}{h} - \varepsilon\right)}{\varepsilon \left(\frac{h}{l}\right) \left(\frac{l}{\delta}\right)} \approx \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon \left(\frac{l}{\delta}\right)}. \quad (4.40)$$

Для прямого и звездообразного фильтров с достаточно развитой поверхностью фильтрации и узкими каналами гофра без большой погрешности можно положить: $\operatorname{tg} \theta \approx \sin \theta$; $\operatorname{tg} \theta' \approx \sin \theta'$, а также

$$\frac{\varepsilon'}{\varepsilon} = \frac{r_{\text{н}}}{r_{\text{в}}}.$$

Соответственно выражения (4.36) и (4.39) с учетом (4.15) и (4.40) записываются в виде

$$\Delta \bar{p} = \frac{1}{\operatorname{Re}} \left[\frac{20\varepsilon^2}{(1 - \varepsilon)^3 \bar{\delta}^2} + \frac{1}{\varepsilon \bar{K}^2} \right] \quad (4.41)$$

— прямой гофр;

$$\Delta \bar{p} = \frac{R \ln(R)}{(R - 1)} \left\{ \frac{10\varepsilon^2}{\operatorname{Re} \bar{\delta}^2} \left[\frac{1}{(1 - \varepsilon)^3} + \frac{R^2}{\varepsilon (1 - \varepsilon R)^3} \right] + \frac{1}{\varepsilon \operatorname{Re} \bar{K}^2} \right\} - \quad (4.42)$$

— звездообразный гофр. Здесь $\Delta \bar{p} = \frac{\Delta p}{\rho W_0^2}$.

В формулах (4.41) и (4.42) $\bar{\delta} = \frac{\delta}{l}$ — относительная

толщина материала гофра; $R = \frac{r_{\text{н}}}{r_{\text{в}}}$ — соотношение ра-

диусов; $\bar{K} = \frac{V \bar{K}}{\delta}$ — относительная проницаемость пористой перегородки.

Формула (4.42) более удобна в следующей записи:

$$\bar{\Delta p} = \bar{\Delta p}_{\text{тр}} + \bar{\Delta p}_{\text{ф}}, \quad (4.43)$$

где

$$\bar{\Delta p}_{\text{тр}} = \frac{10 \ln(R) \varepsilon^2}{\text{Re} \bar{\delta}^2} \left[\frac{1}{(1 - \varepsilon)^3} + \frac{R^2}{(1 - \varepsilon R)^3} \right];$$

$$\bar{\Delta p}_{\text{ф}} = \frac{R^2 \ln(R)}{\varepsilon \bar{K}^2 \text{Re} (R - 1)^2}.$$

Здесь $\text{Re} = \frac{W_0 r_n}{\nu}$; $\bar{\delta} = \frac{\delta}{r_n}$.

Формула (4.43) может быть положена в основу приближенного гидравлического расчета и оптимизации фильтров с жесткой шторой звездообразного типа. Здесь коэффициент плотности шторы следует определять по формуле

$$\varepsilon = \frac{n}{\pi} \cdot \frac{\delta}{r_n}. \quad (4.44)$$

Приведенный выше анализ течения жидкости в идеализированном пористом гофре не учитывает явлений, имеющих место в реальных фильтрах. В частности, трудно учесть деформацию и «слипание» лепестков гофра, повышающих гидравлическое сопротивление фильтра и уменьшающих поверхность фильтрации. Для устранения этих эффектов применяются различные средства. Хорошие результаты, например, дает применение дренажного подслоя из различных сеток [55, 56].

В случае использования дренажного подслоя с высокой проницаемостью, влиянием его на $\bar{\Delta p}_{\text{ф}}$ можно пренебречь. Это означает, что можно $\Delta p_{\text{ф}}$ рассчитывать, как для одного слоя фильтрационного материала. При определении $\Delta p_{\text{тр}}$ необходимо учесть дополнительное заполнение объема гофра сеткой толщиной δ_c , поэтому и ε определять по формуле

$$\varepsilon_c = 0,85 \frac{n}{\pi} \frac{(\delta + \delta_c)}{r_n} = 0,85 \left(1 + \frac{\delta_c}{\delta} \right) \cdot \varepsilon = \eta \varepsilon, \quad (4.45)$$

где 0,85 — коэффициент, учитывающий уменьшение сопротивления трения в канале гофра с сетчатым подслоем по отношению к сплошному подслою.

Выражение (4.41) может быть использовано для приближенной оценки гидравлического сопротивления

складчатых штор с поперечным гофрированием, уложенных в цилиндрическом корпусе (шторы типа б, в, г, д на рис. 4.1). Просто здесь нужно также ввести значение радиальной скорости (4.38), тогда (4.41) для складчатых и пакетированных фильтров принимает вид

$$\Delta \bar{p} = \frac{\ln R}{\text{Re}} \left[\frac{20\varepsilon^2}{(1-\varepsilon)^3 \delta^2} + \frac{R^2}{\varepsilon \bar{K}^2 \text{Re} (R-1)^2} \right], \quad (4.46)$$

где число $\text{Re} = \frac{W_0 r_n}{\nu}$ определяется по расходной скорости потока на огибающей поверхности шторы $F_0 = 2\pi r_n H$.

Необходимо заметить, что формула (4.46) является производной формулы (4.41), справедливой для прямого гофра, в которой коэффициент плотности шторы ε определяется отношением объема материала шторы к общему объему согласно (4.14). Поэтому при пользовании формулой (4.46) коэффициент ε , независимо от конфигурации складчатой шторы, следует определять по общей формуле

$$\varepsilon = \frac{F_\phi \cdot \delta}{\pi (r_n^2 - r_b^2) \cdot H}, \quad (4.47)$$

где F_ϕ ; H — поверхность и высота фильтрующей шторы.

Оценка сопротивления спиральной шторы типа г (см. рис. 4.1) может быть произведена также по производной от (4.41) формуле

$$\Delta \bar{p} = \frac{\bar{H}}{\text{Re}} \left[\frac{20\varepsilon^2}{(1-\varepsilon)^3 \delta^2} + \frac{1}{\bar{H}^2 \varepsilon \bar{K}^2} \right], \quad (4.48)$$

где $\bar{H} = \frac{H}{r_n}$; число $\text{Re} = \frac{W_0 r_n}{\nu}$ определяется по расходной скорости через торцевое сечение цилиндрического объема фильтрующего элемента $F = 2\pi r_n^2$. Коэффициент плотности здесь можно определять через число гофр (см. табл. 4.1).

Полученные на основании теоретического анализа расчетные зависимости можно использовать для гидравлического расчета и оптимизации фильтрующих элементов с различным типом фильтрующих штор.

Методика гидравлического расчета фильтрующих элементов. Наиболее распрост-

раненная конструкция фильтрующего элемента из бумаги и картона включает в себя следующие основные элементы (рис. 4.8): фильтрующую штору 2, обечайку 3, перфорированную трубку 6 и крышку 1. Таким образом, общее гидравлическое сопротивление фильтрующего элемента складывается из суммы сопротивлений проходу жидкости через обечайку, штору, трубку и в трубке, как в коротком канале*. Оценка порядка величин указанных сопротивлений показывает, что для топливно-мас-

ляных фильтров в диапазоне используемых геометрических параметров расходов и физических свойств фильтруемых сред в расчет могут быть

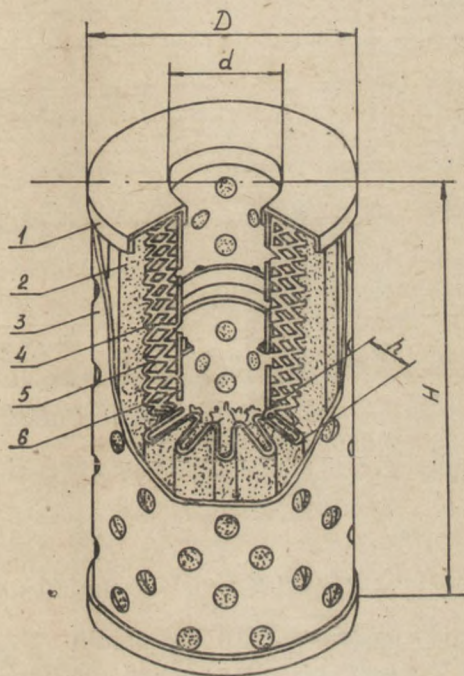


Рис. 4.8. Общий вид фильтрующего элемента со звездообразной фильтрующей шторой: 1 — крышка; 2 — штора; 3 — обечайка; 4 — опорное кольцо; 5 — сетка; 6 — трубка

приняты гидравлические сопротивления шторы, перфорации трубки и самой трубки, как короткого канала.

Общая формула для расчета гидрав-

лического сопротивления фильтрующего элемента может быть представлена в следующем виде [58]:

$$\Delta p = \sum_{i=1}^n \xi_i \frac{\rho v_i^2}{2}, \quad (4.49)$$

* Гидравлическое сопротивление элементов со спиральной (улиткообразной) шторой складывается из сопротивления шторы, входа в элемент и выхода из него.

где ξ_i — коэффициент гидравлического сопротивления шторы, перфорации или трубки; v_i — соответствующая расходная скорости фильтруемой жидкости.

Коэффициенты сопротивления $\xi_i = \frac{2\Delta P_i}{\rho v_i^2}$ для штор различной конфигурации из (4.42), (4.46), (4.48) можно представить так:

звездообразная штора:

$$\xi_1 = \frac{2R \ln(R)}{(R-1)} \left\{ \frac{10\varepsilon^2}{\text{Re} \bar{\delta}^2} \left[\frac{1}{(1-\varepsilon)^3} + \frac{R}{(1-\varepsilon R)^3} \right] + \frac{1}{\varepsilon \text{Re} \bar{K}^2} \right\}; \quad (4.50)$$

складчатая и пакетированная штора:

$$\xi_1 = \frac{2 \ln(R)}{\text{Re}} \left[\frac{20\varepsilon^2}{(1-\varepsilon)^2 \bar{\delta}^2} + \frac{R^2}{(R-1)^2 \varepsilon \bar{K}^2} \right]; \quad (4.51)$$

спиральная (улиткообразная) штора:

$$\xi_1 = \frac{2\bar{H}}{\text{Re}} \left[\frac{20\varepsilon^2}{(1-\varepsilon)^3 \bar{\delta}^2} + \frac{1}{\bar{H}^2 \varepsilon \bar{K}^2} \right]. \quad (4.52)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления перфорации трубки определяется по формуле [58]:

$$\xi = \frac{2\Delta p}{\rho v_{\text{тр}}^2} = (0,707 \sqrt{1-\bar{f}} + 1 - \bar{f})^2 \cdot \frac{1}{\bar{f}}, \quad (4.53)$$

где $\bar{f} = \frac{\sum f_{\text{отв}}}{F_{\text{тр}}}$ — коэффициент живого сечения, выражаемый через площадь отверстий перфорации $\sum f_{\text{отв}}$ к поверхности трубки $F_{\text{тр}}$; $v_{\text{тр}}$ — расходная скорость через огибающую поверхность трубки.

Учитывая, что $v_{\text{тр}} = W_0 \frac{r_{\text{н}}}{r_{\text{в}}} = W_0 R$, коэффициент сопротивления (4.53) приводим к расходной скорости W_0 :

$$\xi_2 = \frac{2\Delta p}{\rho W_0^2} = R^2 (0,707 \sqrt{1-\bar{f}} + 1 - \bar{f})^2 \cdot \frac{1}{\bar{f}}. \quad (4.54)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления жидкости, выходящей через трубку со скоростью u_b , определяется на основании закона Дарси — Вейсбаха [58]:

$$\Delta p = \xi' \frac{H}{2r_B} \cdot \frac{\rho v_B}{2},$$

т. е.

$$\xi = \frac{2\Delta p}{\rho v_B^2} = \xi' \cdot \frac{\bar{H}R}{2}$$

или учитывая, что $v_B = W_0 \frac{\pi r_n H}{\pi r_B^2} = W_0 \bar{H}R$, получаем

$$\xi_3 = \frac{2\Delta p}{\rho W_0^2} = \xi' \frac{(\bar{H}R)^3}{2}, \quad (4.55)$$

где ξ' — коэффициент гидравлического сопротивления, зависящий от режима движения жидкости в трубке.

При ламинарном режиме $Re'_{кр} = \frac{W_0 \bar{H}R r_n}{\nu} = Re \bar{H}R \leq \leq 2 \cdot 10^3$ коэффициент ξ' определяется законом Пуазейля:

$$\xi'_l = \frac{64}{Re'} = \frac{64\nu}{W_0 \bar{H}R \cdot r_n}. \quad (4.56)$$

При турбулентном режиме ($Re \geq 10^5$) по закону Блазиуса.

$$\xi'_t = 0,3164 Re'^{0,25} = 0,3164 \left(\frac{W_0 \bar{H}R r_n}{\nu} \right)^{-0,25}. \quad (4.57)$$

При переходном режиме ($2 \cdot 10^3 < Re' < 10^5$) можно использовать среднестатистическое значение ξ' [59]:

$$\xi'_n = \gamma \cdot \xi'_t + (1 - \gamma) \xi'_l, \quad (4.58)$$

где $\gamma = 1 - \exp[-2 \cdot 10^{-3} (Re' - 2 \cdot 10^3)]$.

Представленные формулы для расчета коэффициентов гидравлического сопротивления отдельных конструктивных элементов фильтров приведены к одной расходной скорости фильтрации на обтекающей поверхности шторы W_0 , поэтому формулу для расчета общего гидравлического сопротивления (4.49) следует представить в виде

$$\Delta p = \frac{\rho W_0^2}{2} \sum_{i=1}^n \xi_i, \quad (4.59)$$

где значения ξ_i определяются по формуле (4.50) — (4.52), (4.54), (4.56) — (4.58).

Выражая скорость W_0 через производительность фильтрующего элемента V (расход жидкости через огибающую поверхность $F_0 = 2\pi r_n H$), можно получить формулу для расчета и построения его гидравлической характеристики:

$$\Delta p = \frac{\rho}{8\pi^2} \left(\frac{V}{r_n H} \right)^2 \sum_{i=1}^n \xi_i. \quad (4.60)$$

Общая методика проведения гидравлического расчета заключается в следующем. Задается вид фильтруемой жидкости (топливо, масло), требуемая тонкость фильтрации, производительность фильтра и основные геометрические размеры фильтрующего элемента: r_n , r_b , H . Затем по заданной тонкости фильтрации выбирается тип фильтровального материала (бумага или картон); исходя из технологических, конструктивных и других соображений выбирается конфигурация и плотность фильтрующей шторы (см. рис. 4.1); задается коэффициент живого сечения перфорации трубки. Далее рассчитываются безразмерные параметры: Re , R , $\bar{H}$, $\bar{\delta}$, $\bar{K}$, ϵ ; коэффициенты гидравлического сопротивления отдельных конструктивных элементов фильтра. По формуле (4.59) определяется общее гидравлическое сопротивление.

Изменяя расход фильтруемой жидкости, можно построить ожидаемую гидравлическую характеристику элемента в виде зависимости $\Delta p = f(V)$ по формуле (4.60).

Проверка рассмотренной методики расчета с помощью экспериментальных данных показывает, что она в целом учитывает все основные факторы, определяющие гидравлические свойства топливно-масляных элементов из бумаги и картона и позволяет достаточно точно оценивать их гидравлические свойства. Примеры сравнения расчетных и экспериментальных характеристик приведены на рис. 4.9 и 4.10.

Примеры гидравлического расчета

Пример 1. Определить общее гидравлическое сопротивление фильтрующего элемента производительностью $V = 100$ л/мин $= 1,66 \cdot 10^{-3}$ м³/с, работающего

на масле ИГП-30 ($\rho = 900 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 30 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$). Фильтрующий элемент оснащен звездообразной шторой с числом гофр $n = 70$ из бумаги БТ-15П ($\delta = 0,53 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $K = 2,75 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$), штора выполнена с дренажным сетчатым подслоем из полиэтиленовой сетки толщиной $\delta_c = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Рабочее пространство фильтра имеет следующие геометрические размеры: $r_n = 46 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $r_b = 24 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $H = 188 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Фильтрующий элемент оснащен трубкой с коэффициентом живого сечения перфорации $\bar{f} = 0,5$.

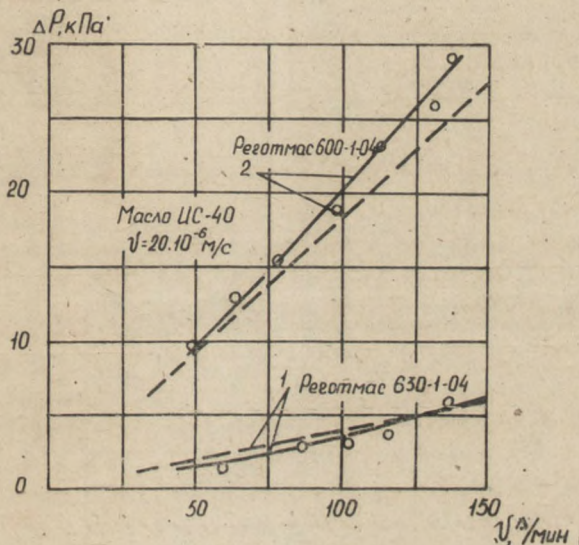


Рис. 4.9. Схема экспериментальной и теоретической характеристики элементов, испытываемых на масле ИС-40 при вязкости 20 сСт: 1, 2 — фильтры

Следуя методике, изложенной выше, расчет производим в следующем порядке:

1. Определяем расходную скорость фильтрации через огибающую поверхность шторы:

$$W_0 = \frac{V}{2\pi r_n H} = \frac{1,66 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot 46 \cdot 10^{-3} \cdot 188 \cdot 10^{-3}} = 0,0305 \text{ м/с.}$$

2. Рассчитываем безразмерные параметры:

$$\text{Re} = \frac{W_0 r_n}{\nu} = \frac{0,0305 \cdot 46 \cdot 10^{-3}}{30 \cdot 10^{-6}} = 46,7;$$

$$R = \frac{r_H}{r_B} = \frac{46 \cdot 10^{-3}}{24 \cdot 10^{-3}} = 1,91;$$

$$\bar{H} = \frac{H}{r_H} = \frac{188 \cdot 10^{-3}}{46 \cdot 10^{-3}} = 4,08;$$

$$\bar{\delta} = \frac{\delta}{r_H} = \frac{0,53 \cdot 10^{-3}}{46 \cdot 10^{-3}} = 11,52 \cdot 10^{-3};$$

$$\bar{K} = \frac{V\bar{K}}{\delta} = \frac{V 2,75 \cdot 10^{-12}}{0,53 \cdot 10^{-3}} = 3,11 \cdot 10^{-3}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_c &= 0,85 \left(1 + \frac{\delta_c}{\delta} \right) \cdot \frac{n \cdot \delta}{\pi \cdot r_H} = 0,85 \left(1 + \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{0,53 \cdot 10^{-3}} \right) \times \\ &\times \frac{70 \cdot 0,53 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 46 \cdot 10^{-3}} = 0,42. \end{aligned}$$

$\Delta \rho_{\text{к}} / \text{см}^2$

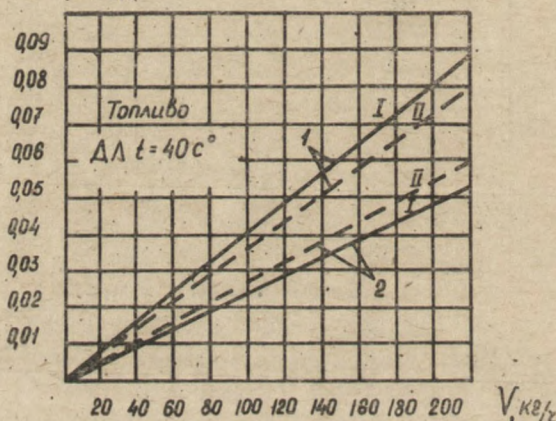


Рис. 4.10. Сравнение экспериментальной и теоретической гидравлической характеристики топливных фильтрующих элементов со спирально-складчатой фильтрующей шторой из бумаги БФДТ по данным [63]: I — $R = r_H/r_B = 4,69$; $\varepsilon = 0,41$; $\bar{H} = 1,98$; 2 — $R = r_H/r_B = 3,52$; $\varepsilon = 0,34$; $\bar{H} = 2,51$; I — эксперимент; II — расчет

3. Определяем коэффициент гидравлического сопротивления шторы по формуле (4.50):

$$\xi_1 = \frac{2R \ln(R)}{(R-1)} \left\{ \frac{10\varepsilon_i^2}{\text{Re} \bar{\delta}^2} \left[\frac{1}{(1-\varepsilon_c)^3} + \frac{R^2}{(1-\varepsilon_c R)^3} \right] + \right.$$

$$+ \frac{1}{\varepsilon_c \operatorname{Re} \bar{K}^2} \left\} = \frac{2 \cdot 1,91 \cdot \ln(1,91)}{(1,91 - 1)} \left\{ \frac{10 \cdot 0,42^2}{46,7 \cdot (11,52 \cdot 10^{-3})^2} \times \right. \\ \times \left[\frac{1}{(1 - 0,42)^3} + \frac{1,91^2}{(1 - 0,42 \cdot 1,91)^3} \right] + \\ \left. + \frac{1}{0,42 \cdot 46,7 \cdot (3,11 \cdot 10^{-3})^2} \right\} = 53274.$$

4. Определяем коэффициент гидравлического сопротивления перфорированной трубки по формуле (4.54):

$$\xi_2 = R^2 (0,707 \sqrt{1 - \bar{f}} + 1 - \bar{f}) \cdot \frac{1}{\bar{f}} = \\ = 1,91^2 (0,707 \sqrt{1 - 0,5} + 1 - 0,5) \cdot \frac{1}{0,5} = 7,3.$$

5. Определяем коэффициент гидравлического сопротивления в трубке. Для этого находим $\operatorname{Re}' = \operatorname{Re} H R = = 363,9$, т. е. течение является ламинарным, поэтому по формуле (4.57) находим

$$\xi_3 = \frac{64}{\operatorname{Re}'} = \frac{64}{363,9} = 0,1758.$$

Таким образом, в этом случае значительно преобладает сопротивление фильтрующей шторы.

6. Находим общее сопротивление фильтрующего элемента по формуле (4.60):

$$\Delta p = \frac{\rho}{8\pi^2} \left(\frac{V}{r_n H} \right)^2 (\xi_1 + \xi_2 + \xi_3) = \\ = \frac{900}{8\pi^2} \left(\frac{1,66 \cdot 10^{-3}}{46 \cdot 10^{-3} \cdot 188 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \cdot (53274 + 7,3 + 0,1758) = \\ = 21,87 \text{ кПа} \approx 0,218 \text{ кг/см}^2$$

Пример 2. Определить общее гидравлическое сопротивление фильтрующего элемента производительностью $V = 8,16 \text{ л/мин} = 136 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, работающего на масле вязкостью $\nu = 50 \text{ сСт} = 50 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ($\rho = = 900 \text{ кг/м}^3$). Фильтрующий элемент оснащен спирально-складчатой шторой с поверхностью $F_\phi = 0,769 \text{ м}^2$. Штора выполнена из бумаги БФМ ($\delta = 0,35 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $K = 4,76 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$). Укладка шторы сделана в корпусе при $r_n = = 53 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $r_b = 18,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $H = 57 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Учитывая для данной укладки только сопротивление шторы и внутреннего цилиндрического канала, расчет производим в такой последовательности:

1. Определяем расходную скорость фильтрации через огибающую внешнюю цилиндрическую поверхность шторы:

$$W_0 = \frac{V}{2\pi r_n H} = \frac{136 \cdot 10^{-6}}{2\pi \cdot 53 \cdot 10^{-3} \cdot 57 \cdot 10^{-3}} = 0,0071 \text{ м/с.}$$

2. Рассчитываем безразмерные параметры:

$$Re = \frac{W_0 \cdot r_n}{\nu} = \frac{0,0071 \cdot 53 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^{-6}} = 7,59;$$

$$R = \frac{r_n}{r_b} = \frac{53 \cdot 10^{-3}}{18,5 \cdot 10^{-3}} = 2,86;$$

$$\bar{H} = \frac{H}{r_n} = \frac{57 \cdot 10^{-3}}{53 \cdot 10^{-3}} = 1,075;$$

$$\bar{\delta} = \frac{\delta}{r_n} = \frac{0,35 \cdot 10^{-3}}{53 \cdot 10^{-3}} = 6,22 \cdot 10^{-3};$$

$$\bar{K} = \frac{V\bar{K}}{\delta} = \frac{V4,76 \cdot 10^{-12}}{0,35 \cdot 10^{-3}} = 6,6 \cdot 10^{-3};$$

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{F_{\phi} \bar{\delta}}{\pi (r_n^2 - r_b^2) H} = \\ &= \frac{0,769 \cdot 0,35 \cdot 10^{-3}}{\pi [(53 \cdot 10^{-3})^2 - (18,5 \cdot 10^{-3})^2] \cdot 57 \cdot 10^{-3}} = 0,57. \end{aligned}$$

3. Определяем коэффициент гидравлического сопротивления шторы по формуле (4.51):

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \frac{2 \ln(R)}{Re} \left[\frac{20\varepsilon^2}{(1-\varepsilon)^3 \bar{\delta}^2} + \frac{R^2}{(R-1)^2 \varepsilon \bar{K}^2} \right], \text{ т. е} \\ \xi_1 &= \frac{2 \ln(2,86)}{7,59} \left[\frac{20 \cdot 0,57^2}{(1-0,57)^3 (6,22 \cdot 10^{-3})^2} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{8,17}{(2,86-1)^2 \cdot 0,57 \cdot (6,6 \cdot 10^{-3})^2} \right] = 612 \cdot 10^3. \end{aligned}$$

4. Определяем коэффициент гидравлического сопротивления во внутреннем цилиндрическом канале шторы. Для этого находим $Re' = ReHR = 7,59 \cdot 1,075 \cdot 2,86 =$

$= 20,88$, т. е. течение является ламинарным, поэтому по формуле (4.57) вычислим

$$\xi_3 = \frac{64}{\text{Re}'} = \frac{64}{20,88} = 3,065.$$

5. Находим общее сопротивление фильтрующего элемента по формуле (4.60):

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{\rho}{8\pi^2} \left(\frac{V}{r_n H} \right)^2 (\xi_1 + \xi_3) = \\ &= \frac{900}{8 \cdot \pi^2} \left(\frac{136 \cdot 10^{-6}}{53 \cdot 10^{-3} \cdot 57 \cdot 10^{-3}} \right)^2 (613 \cdot 10^3 + 3,065) = \\ &= 13,95 \text{ кПа} \approx 0,14 \text{ кг/см}^2. \end{aligned}$$

4.3. Оптимизация выбора фильтровальных материалов и исходных конструктивных параметров

При проектировании гофрированных фильтров выбор типа фильтровального материала, а также исходных геометрических параметров шторы является важным и определяющим с точки зрения получения наибольшей эффективности очистки и ресурса фильтра.

При выборе фильтровального материала обычно исходят из требований обеспечения необходимой чистоты фильтруемой жидкости по тонкости фильтрации. Тонкость фильтрации определяется экспериментально. Для бумаг и картонов может быть использован один из расчетных методов, рассмотренных в гл. III.

Фильтровальная бумага, выбранная в соответствии с требуемой тонкостью фильтрации, должна обладать высокой проницаемостью, малой толщиной, быть прочной и стойкой к физико-химическому воздействию фильтруемой жидкости.

При одной и той же тонкости фильтрации целесообразным считается выбор бумаги, имеющей более высокую проницаемость и меньшую толщину. Из формулы (4.43) следует, что фильтрационная составляющая гидравлического сопротивления фильтра $\Delta p_{\text{ф}}$ существенно

зависит от значения структурного симплекса $\bar{K} = \frac{V\bar{K}}{\delta}$, выражающего соотношение проницаемости и толщины бумаги.

При сравнении бумаг, имеющих одинаковую тонкость фильтрации и прочность, преимущество должно быть отдано бумаге с более высоким значением K (см. табл. 4.3). Таким образом, симплекс $\bar{K}$ может быть рекомендован в качестве объективного критерия выбора фильтровальных бумаг.

К исходным конструктивным параметрам проектируемых фильтрующих элементов (см. рис. 4.8) относятся: наружные габаритные размеры, определяемые требуемой производительностью фильтра и местом его установки, а также диаметр внутренней трубки, определяемый размерами подсоединительных трубопроводов соответствующего типоразмера, удовлетворяющего условиям стандартизации.

Таблица 4.3
Оценка фильтровальных бумаг по показателю $\bar{K}$

Бумага	НТФ, мкм	K , м ²	δ , мм	$\bar{K}$
БФМ	15—20	$4,76 \times 10^{-12}$	0,35	$62,3 \times 10^{-4}$
КФМ	15—20	$12,5 \times 10^{-12}$	0,87	$40,6 \times 10^{-4}$
БТ-15П	10—15	$2,75 \times 10^{-12}$	0,53	$31,2 \times 10^{-4}$
АФБ-1К	8—12	$1,1 \times 10^{-12}$	0,29	36×10^{-4}
БТ-3П	3—5	$0,15 \times 10^{-12}$	0,46	$8,4 \times 10^{-4}$
БФДТ	3—5	$0,045 \times 10^{-12}$	0,33	$6,28 \times 10^{-4}$

При заданном значении наружного радиуса звездообразного гофра r_n (см. рис. 4.7) и отсутствия регламентации на r_b по присоединительной арматуре выбор соотношения $R = \frac{r_n}{r_b}$ должен производиться из условия получения наибольшей поверхности фильтрации, определяемой коэффициентом гофрирования:

$$K_F = \frac{F_\Phi}{F_0} = \frac{\pi(r_n - r_b) \cdot n}{\pi r_n} = \frac{n}{\pi} \cdot \frac{(R - 1)}{R},$$

который будет иметь максимальное значение при плотной укладке максимального числа вершин гофра на длине окружности радиуса r_b :

$$n_{\max} = \frac{2\pi r_b}{2\delta} = \frac{\pi r_n}{\delta R},$$

$$K_F = \frac{1}{\delta} \cdot \frac{(R-1)}{R^2}. \quad (4.61)$$

Зависимость $K_F=f(R)$ согласно (4.61) имеет экстремальный характер. Взяв производную и приравняв ее к нулю, получим

$$\frac{dK_F}{dR} = \frac{1}{\delta} \left(\frac{2}{R^3} - \frac{1}{R^2} \right) = 0. \quad (4.62)$$

Решая (4.62) относительно R , находим, что наибольший коэффициент гофрирования достигается при $R=2$. Эта величина является рекомендуемой при выборе соотношения $R = \frac{r_n}{r_b}$ для фильтрующих элементов со звездчатой шторой.

Выбор соотношения R для фильтрующих элементов складчатого типа с поперечным гофрированием не может быть сделан из условия получения максимального K_F , так как любое увеличение R приводит к увеличению K_F , но при этом, даже при неизменной плотности укладки, растет начальное гидравлическое сопротивление шторы. Поэтому выбор соотношения R для штор складчатого типа является задачей комплексной оптимизации по гидравлическим свойствам и ресурсу работы.

При выборе соотношения высоты фильтрующего элемента H и наружного радиуса r_n необходимо пользоваться соображениями, вытекающими из требований к производительности и габаритным размерам фильтра. При этом максимальная высота H принимается равной $2r_n$, так как при меньшей высоте возрастает доля фильтрующей шторы, которая не используется (крышки, клей). Максимальная высота не должна превышать $8r_n$. Эти соотношения подтверждаются отечественной и зарубежной практикой производства фильтрующих элементов [55].

4.4. Оптимизация фильтрующих элементов по гидравлическим свойствам

Общим критерием совершенства фильтрующих элементов, предназначенных для очистки топлив, масел и специальных жидкостей, является их работоспособность,

определяемая ресурсом работы по очистке загрязненных жидкостей с заданной тонкостью фильтрации. Ресурс определяется временем работы (или количеством фильтра-та) от начального до заданного (критического) гидравлического сопротивления. После достижения критического сопротивления, определяемого прочностью фильтрующей шторы, энергетическими затратами на прокачивание топлива или масла через фильтр, либо другими критериями, фильтрующий элемент, потерявший работоспособность, подвергается регенерации либо замене.

Продление срока службы фильтрующих элементов до их регенерации или замены — главная задача разработчиков и эксплуатационников, имеющая важное народно-хозяйственное значение.

Высокий ресурс топливно-масляных фильтрующих элементов может быть обеспечен уже на стадии проектирования фильтров с использованием специальных методов оптимизации. Разработка этих методов может базироваться на изучении и целесообразном использовании гидродинамических и физико-химических процессов, протекающих в пористых перегородках при фильтрации топливных суспензий и эмульсий.

Простейшие методы оптимизации бумажных фильтрующих элементов по ресурсу работы можно свести, например, к выбору оптимальной геометрии фильтрующей шторы, обеспечивающей минимальное начальное гидравлическое сопротивление, а также максимальный ресурс. Во всех случаях поиск оптимального решения без привлечения трудоемких лабораторных или натурных испытаний возможен при наличии математического описания гидравлической и ресурсной характеристики рассматриваемых фильтрующих элементов. Например, применительно к звездообразным фильтрующим элементам анализ формулы (4.43) показывает, что в зависимости от значения коэффициента плотности шторы ϵ преобладает одно из составляющих общего гидравлического сопротивления ($\Delta p_{тр}$ или $\Delta p_{ф}$). При уменьшении поверхности гофрирования шторы преобладает $\Delta p_{ф}$, а при увеличении поверхности в рамках одного и того же объема преобладает $\Delta p_{тр}$. Должно существовать оптимальное значение ϵ , обеспечивающее минимальное значение Δp .

На рис. 4.11 приведена расчетная, по формуле (4.43), зависимость $\Delta p = f(\epsilon)$, для бумажных фильтрующих элементов «Реготмас 630—1—04» [55], показывающая воз-

возможность оптимизации начальных гидравлических свойств гофрированного звездообразного фильтра по ϵ , а следовательно, и по числу гофр при заданных характеристиках фильтрующей шторы и общих размерах фильтрующего элемента. Из рис. 4.11 следует, что минимальное гидравлическое сопротивление фильтрующего элемента (в данном случае с дренажной сеткой) будет достигнуто при $\epsilon \approx 0,175$.

Результаты гидравлических испытаний звездообразных фильтрующих элементов одного и того же типоразмера, но с различной плотностью укладки бумажной шторы по числу гофр подтверждают характер теоретической зависимости, приведенной на рис. 4.11. На рис. 4.12 представлены результаты гидравлических испытаний,

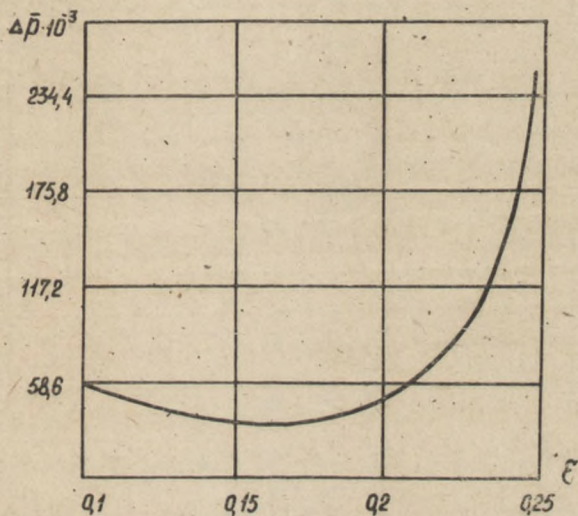


Рис. 4.11. Зависимость гидравлического сопротивления звездообразного элемента от ϵ ($\bar{K} = 2,63 \cdot 10^{-3}$; $R = 1,91$; $\bar{\delta} = 9,3 \cdot 10^{-3}$; $Re = 70,15$)

проведенных в объединении «Вторнефтепродукт» с фильтрующими элементами типа «Реготмас—441» на масле АС-8 при $t = 75^\circ\text{C}$. В этих испытаниях использовались элементы с одним и тем же внешним радиусом шторы $r_{\text{н}}$ из бумаги БФМ, но с переменным внутренним радиусом и числом гофр n .

На рис. 4.13 представлена экспериментальная зависимость $\Delta p = f(n)$, построенная на основании рис. 4.12 при различных значениях соотношения внешнего и внутреннего радиусов шторы R , показывающая существование оптимальной плотности шторы по числу гофр для каждого значения R .

Теоретические экстремальные зависимости гидравлического сопротивления фильтрующих штор звездообразного типа от плотности укладки шторы могут быть по-

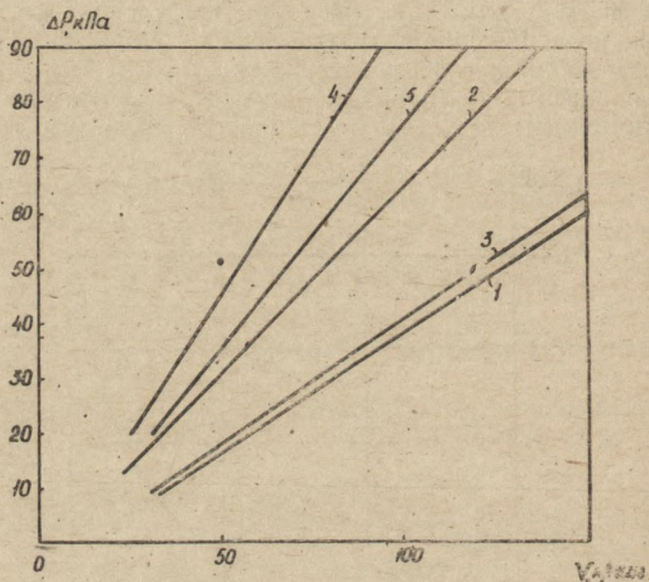


Рис. 4.12 а. Гидравлические характеристики фильтроэлементов «Реготмас-441» из БФМ. Высота гофр: 1—20 мм, 113 гофр; 2—25 мм, 123 гофры; 3—17 мм, 125 гофр; 4—25 мм, 147 гофр; 5—20 мм, 150 гофр

строены на основании общей формулы (4.43). Умножив Δp на Re в (4.43), получаем формулу для определения коэффициента гидравлического сопротивления, учитывающего влияние геометрии шторы:

$$\lambda = \lambda_{тр} + \lambda_{ф}$$

или

$$\lambda = \frac{10 (\eta \varepsilon)^2 \ln(R)}{\delta^2} \left[\frac{1}{(1 - \eta \varepsilon)^3} + \frac{R^2}{(1 - \eta \varepsilon R)} \right] +$$

$$+ \frac{R^2 \ln(R)}{\varepsilon K^2 (R-1)^2}, \quad (4.63)$$

где $\eta = 0.85(1 + \delta_c/\delta)$ учитывает влияние дренажной сетки, при отсутствии которой следует положить $\eta = 1$.

На рис. 4.14 показаны экстремальные зависимости $\lambda = f(\varepsilon)$ при $R = 2$ для трех типоразмеров звездообразных штор ($r_{н1} = 28$ мм; $r_{н2} = 45$ мм; $r_{н3} = 73$ мм) и основных типов фильтровальных бумаг при $R = 2$ и $\eta = 1$. Кривые на рис. 4.14 демонстрируют существование оптимальной плотности укладки фильтрующих штор для всех применяемых фильтровальных бумаг и картонов.

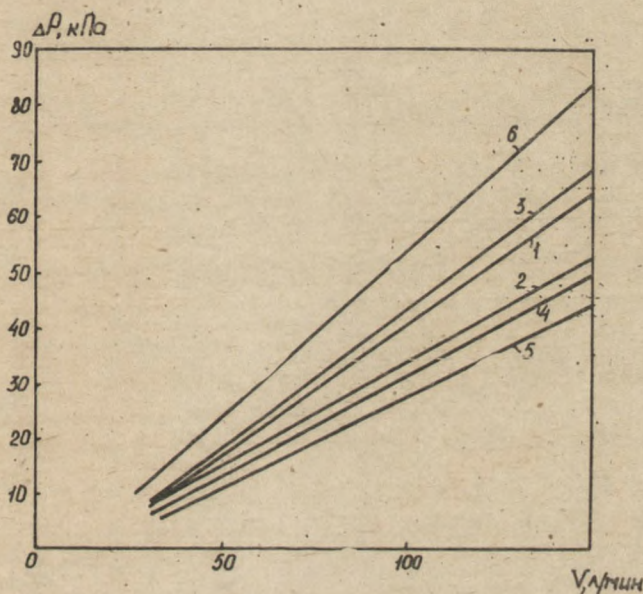


Рис. 4.12 б. Гидравлические характеристики фильтроэлементов «Реготмас-441» из БФМ. Высота гофр: 1 — 24 мм, 46 гофр; 2 — 20 мм, 56 гофр; 3 — 25 мм, 62 гофр; 4 — 20 мм, 75 гофр; 5 — 17 мм, 83 гофры; 6 — 25 мм, 93 гофры

Таким образом, зависимости (4.43) и (4.63) можно использовать для оптимизации фильтрующих штор звездообразного типа по гидравлическим свойствам. Для

этого необходимо построить зависимость $\Delta p = f(\varepsilon)$ или $\lambda = f(\varepsilon)$ при заданных R ; $\bar{\delta}$; $\bar{K}$. При $R = 2$, обеспечивающим наибольшую поверхность фильтрации, может быть построена номограмма для определения оптимального числа гофр.

Для получения расчетной номографической зависимости необходимо исследовать функцию (4.63) на экстремум. Взяв производную от (4.63) по ε , приравнявая к нулю и упрощая при $R = 2$, получаем

$$\frac{\bar{\delta}}{\bar{K}} = \sqrt{\frac{5}{2} \eta^2 \varepsilon^3 \left[\frac{2 + \eta \varepsilon}{(1 - \eta \varepsilon)^4} + \frac{8(1 + \eta \varepsilon)}{(1 - 2\eta \varepsilon)^4} \right]}. \quad (4.64)$$

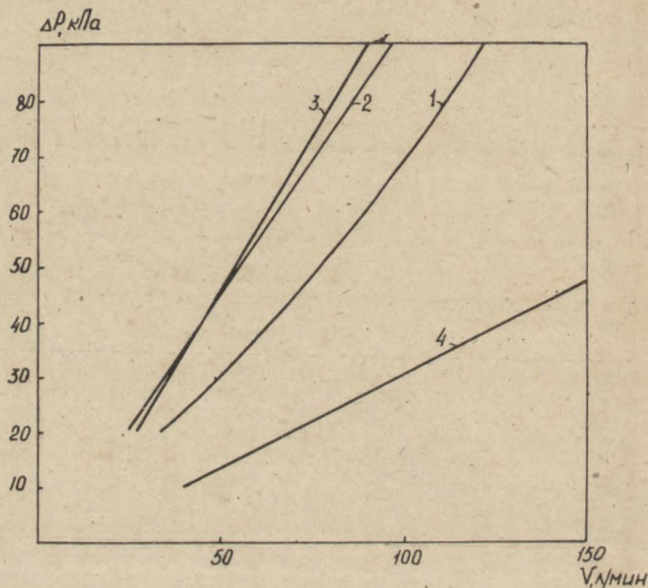


Рис. 4.12 в. Гидравлические характеристики фильтроэлементов «Реготмас-441» из БФМ. Высота гофр: 1—25 мм, 166 гофр; 2—20 мм, 180 гофр; 3—17 мм, 199 гофр; 4—17 мм, 62 гофры

Уравнение (4.64) совместно с (4.44) положено в основу построения номограммы (рис. 4.15) для определения числа гофр звездообразной шторы, обеспечивающего минимальное гидравлическое сопротивление. Правило пользования номограммой показано пунктиром.

Рассмотренные методы оптимизации фильтрующих элементов звездообразного типа по гидравлическим свойствам могут быть использованы для фильтрующих штор любого типа. При этом общий подход к шторе любой конфигурации остается тем же, а геометрические особенности шторы учитываются в соответствующих зависимостях для гидравлического сопротивления.

4.5. Оптимизация фильтрующих элементов по ресурсу работы

Оптимальные геометрические параметры фильтрующих штор, найденные из условия минимального гидравлического сопротивления, не всегда обеспечивают наи-

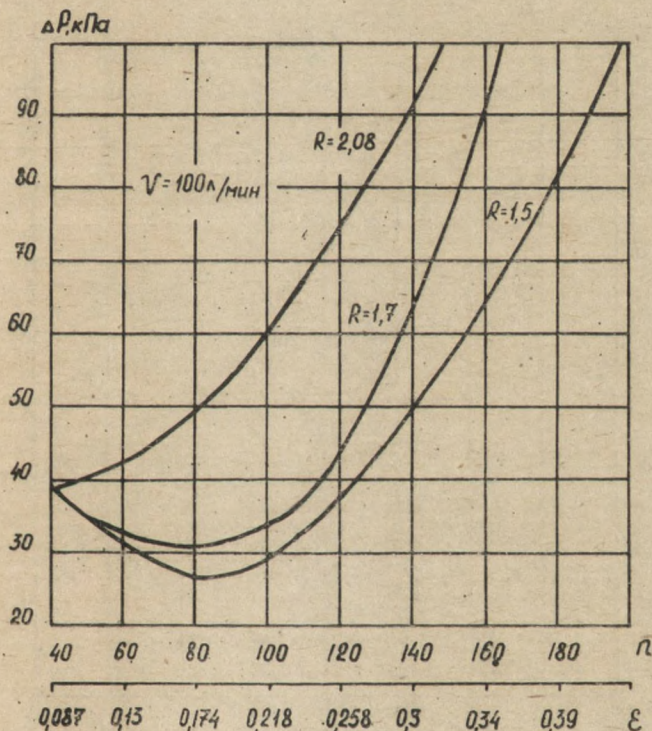


Рис. 4.13. Экспериментальная зависимость гидравлического сопротивления звездообразного фильтрующего элемента из бумаги БФМ от числа гофр (типоразмер «Реготмас-441»)

большой ресурс элемента. Необходима оптимизация по ресурсу работы.

Выше было отмечено, что увеличение поверхности фильтрации приводит к росту ресурса фильтрующего элемента за счет увеличения его грязеемкости. Однако увеличение поверхности и соответствующее значительное увеличение плотности фильтрующей шторы ϵ приводит

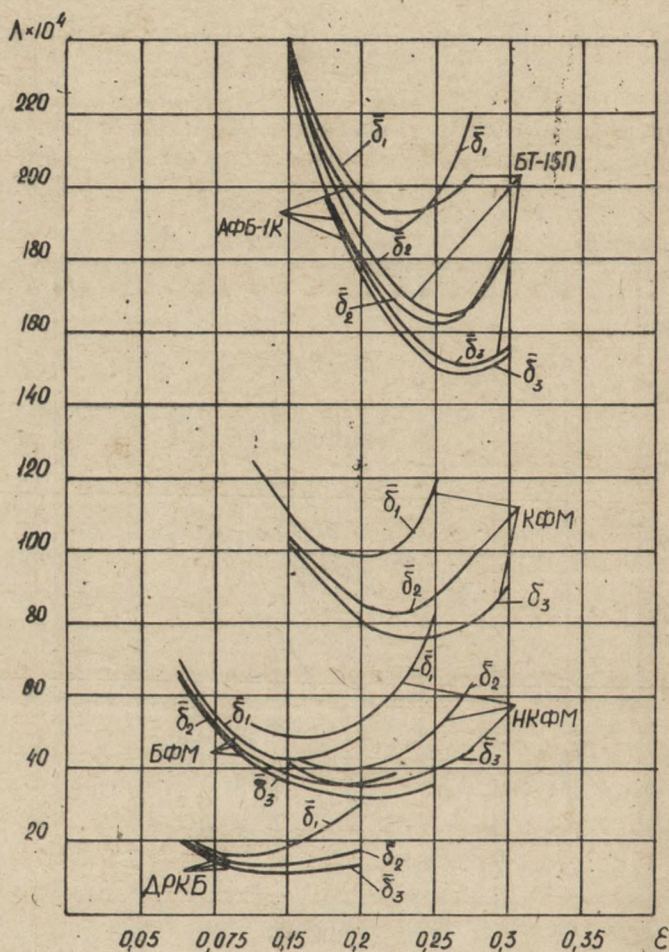


Рис. 4.14. Влияние плотности укладки шторы на гидравлическое сопротивление гофрированного фильтра

к возрастанию начального гидравлического сопротивления фильтра, а следовательно, — к уменьшению ресурса. Таким образом, при известной закономерности фильтрации можно попытаться найти оптимальную ресурсную характеристику рассматриваемого фильтрующего элемента.

Применительно к звездообразному гофрированному элементу эта задача решается следующим образом [60]. Полагая протекание процесса фильтрации с забивкой пор по промежуточному закону, обобщенное уравнение фильтрования топливных суспензий (3.32) можно переписать в виде

$$\frac{\Delta p'_\Phi}{\Delta p_\Phi} = \exp \left(0.143 \frac{q \varphi_0 c_0}{\Psi \delta} \right), \quad (4.65)$$

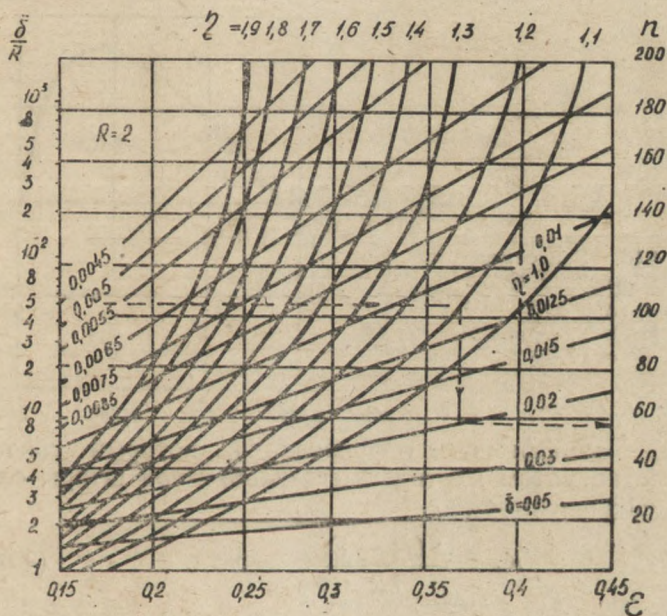


Рис. 4.15. Номограмма для определения числа гофр звездообразной шторы, обеспечивающего минимальное гидравлическое сопротивление

где Δp_Φ — фильтрационная составляющая начального перепада давления на фильтрующей шторе; $\Delta p'_\Phi$ — филь-

трационная составляющая критического (допустимого) перепада давления.

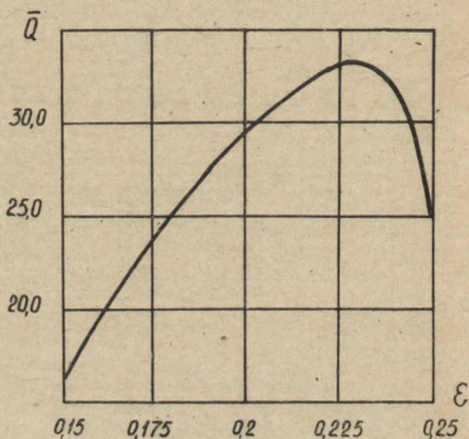
Из (4.65) выражается удельный объем фильтрата как ресурсная характеристика:

$$q = \frac{\Psi \delta}{0,143 \varphi c_0} \cdot \ln \left(\frac{\Delta \bar{p}'_{\Phi}}{\Delta \bar{p}_{\Phi}} \right). \quad (4.66)$$

Для гофрированной перегородки фильтрующего элемента общий объем фильтрата возрастает пропорционально поверхности и формула (4.66) записывается в виде

$$Q = q F_0 K_F = \frac{F_0 \Psi \delta}{0,143 \varphi c_0} \cdot K_F \cdot \ln \left(\frac{\Delta \bar{p}'_{\Phi}}{\Delta \bar{p}_{\Phi}} \right), \quad (4.67)$$

Рис. 4.16. Зависимость условного ресурса фильтра от ε ($K = 2,63 \cdot 10^{-3}$; $\delta = 9,3 \cdot 10^{-3}$; $R = 1,91$; $Re = 70,15$)



где K_F — коэффициент гофрирования, который связан с коэффициентом плотности звездообразной шторы следующей зависимостью:

$$K_F = \frac{\varepsilon (R - 1)}{\delta R}. \quad (4.68)$$

С учетом (4.68) формула (4.67) приводится к виду

$$\bar{Q} = \frac{\varepsilon (R - 1)}{\delta R} \cdot \ln \left(\frac{\Delta \bar{p}'_{\Phi}}{\Delta \bar{p}_{\Phi}} \right), \quad (4.69)$$

где $\bar{Q} = \frac{Q \cdot 0,143 \varphi c_0}{F_0 \Psi \delta}$ — безразмерный параметр, характеризующий удельную грязе-

емкость фильтрующей шторы, отнесенную к единице внешней огибающей поверхности гофра.

Увеличение общего сопротивления гофрированного фильтра в процессе его работы происходит за счет увеличения $\Delta \bar{p}_\phi$ при неизменном $\Delta p_{тр}$. Поэтому при заданном предельном (критическом) значении общего сопротивления фильтра $\Delta p_{кр}$ его ресурс по удельной грязеемкости составит

$$\bar{Q} = \frac{\varepsilon(R-1)}{\delta R} \cdot \ln \left(\frac{\Delta \bar{p}_{кр} - \Delta \bar{p}_{тр}}{\Delta \bar{p}_\phi} \right). \quad (4.70)$$

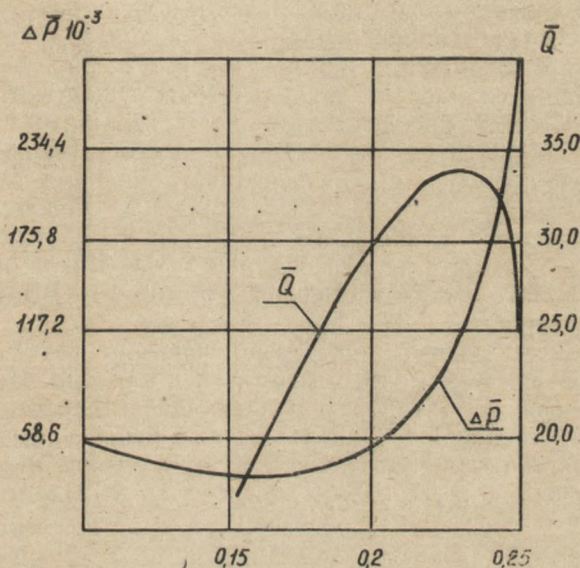


Рис. 4.17. Сравнительная зависимость условного ресурса и гидравлического сопротивления фильтра от ε ($\bar{K} = 2,63 \cdot 10^{-3}$; $\delta = 9,3 \cdot 10^{-3}$; $R = 1,91$; $Re = 70,15$)

Выражение (4.70) с учетом (4.43) можно использовать для оптимизации звездообразных фильтрующих элементов по ресурсу работы, выраженному через удельную грязеемкость. Пример такой оптимизации приведен на рис. 4.16 для бумажных фильтрующих элементов

«Реготмас 630—1—04» [54] в виде зависимости, показывающей возможность оптимизации ресурса фильтрующего элемента по ϵ , а следовательно, и по числу гофр фильтрующего элемента.

Сравнение кривых $\Delta \bar{p} = f(\epsilon)$ и $\bar{Q} = f(\epsilon)$ для одного и того же фильтрующего элемента на рис. 4.17 показывает, что оптимальное заполнение объема по начальному гидравлическому сопротивлению не является оптимальным по ресурсу. Это противоречит традиционным представлениям о том, что фильтрующий элемент с минимальным начальным гидравлическим сопротивлением будет иметь максимальный ресурс.

Рассмотренный метод сводится к поиску одного оптимального безразмерного параметра ϵ при заданном R . Для гофрированных бумажных штор (см. рис. 4.1, а—д) в общем случае для каждой шторы существует комбинация ϵ и R , обеспечивающая максимальный ресурс работы фильтра. Поиск оптимальной комбинации ϵ и R можно производить с использованием зависимостей типа (4.70). В этом случае задача оптимизации сводится к задаче условного нелинейного программирования, а решение ее возможно с использованием ЭВМ. Метод оптимизации фильтрующих элементов с помощью ЭВМ рассмотрен в работе [64].

Таким образом, достаточно полная оптимизация фильтрующих элементов из бумаги и картона возможна с учетом всех факторов, определяющих гидродинамические свойства фильтрующей шторы, физико-химические свойства топливных суспензий, а также закономерностей фильтрования в пористых перегородках. Применение методов оптимизации с учетом всех основных факторов, а также оптимизации с использованием ЭВМ позволит существенно сократить объем многовариантного экспериментирования, применяемого в настоящее время для разработок оптимальных конструкций топливно-масляных фильтров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чертков Я. Б., Рыбаков К. В., Зрелов В. Н. Загрязнения и методы очистки нефтяных топлив. — М.: Химия, 1970. — 238 с.
2. Григорьев М. А. Очистка масла и топлива в автотракторных двигателях. — М.: Машиностроение, 1960. — 272 с.
3. Рыбаков К. В. Фильтрация авиационных топлив. — М.: Транспорт, 1973. — 163 с.
4. Удлер Э. И. Фильтрация углеводородных топлив. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1981. — 155 с.
5. Емельянов Л. А. Фильтрация дизельного топлива. — М.—Л.: Машгиз, 1962. — 106 с.
6. Рыбаков К. В., Коваленко В. П. Фильтрация авиационных масел и специальных жидкостей. — М.: Транспорт, 1977. — 192 с.
7. Коваленко В. П. Загрязнения и очистка нефтяных масел. — М.: Химия, 1978. — 302 с.
8. Белянин П. Н., Черненко Ж. С. Авиационные фильтры и очистители гидравлических систем. — М.: Машгиз, 1964. — 294 с.
9. Большаков Г. Ф. Восстановление и контроль качества нефтепродуктов. — Л.: Недра, 1974. — 317 с.
10. Коновалов В. М., Скрицкий В. Я., Рокшевский В. А. Очистка рабочих жидкостей в гидроприводах станков. — М.: Машиностроение, 1976. — 288 с.
11. Гурвич И. Л. Технология переработки нефти и газа. — М.: Химия, 1972. — 202 с.
12. Грузе В., Стивенс Д. Технология переработки нефти. — Л.: Химия, 1974. — 206 с.
13. Рыбаков К. В., Коваленко В. П., Турчанинов В. Е. Очистка нефтепродуктов от механических примесей и воды. Сер. «Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья». — М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1974. — 78 с.
14. Шевченко В. С. Исследование и обеспечение надежности и долговечности машин. — Минск: Изд-во АН СССР, 1973—203 с.
15. Селиванов А. И. Дизельная топливная аппаратура. — М.: Сельхозгиз, 1954. — 534 с.
16. Руденко А. И., Рыбаков К. В. — Техника в сельском хозяйстве, 1963, № 9, с. 66—68.
17. Чертков Я. Б., Рыбаков К. В. Предотвращение загрязнения и очистка топлива. Сер. «Транспорт, хранение нефти и нефтепродуктов». — М.: ЦНИИТЭнефтегаз, 1963. — 36 с.

18. Кондратов В. В. Исследование фильтрации топлив и разработка метода повышения надежности плунжерных пар: Дис. ... канд. техн. наук. — Л., 1969. — 167 с.

19. Фильтр секционный унифицированный ФСУ-150. — М.: ОНТИ объедин. Вторнефтепродукт, 1978. — 2 с.

20. Гуреев А. А. Применение автомобильных бензинов. — М.: Химия, 1972. — 169 с.

21. Ронжина Н. Ф., Спиркин В. Г., Чернова К. С. и др. Исследование температур и влажности реактивных топлив, поступающих в аэропорты гражданской авиации. — В кн.: Эксплуатационные свойства авиационных топлив: Труды конференции. Киев: ОНТИ КИИ ГА, 1969, с. 136—143.

22. Венцель С. В. Смазка двигателей внутреннего сгорания. — Киев: Машгиз, 1963. — 179 с.

23. Матвеев А. С. — Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 1972, № 7, с. 15—18.

24. Никитин Г. А. Влияние загрязненности жидкости на надежность работы элементов гидроавтоматики. — В кн.: Теория машин-автоматов и пневмогидроприводов. — М.: Машиностроение, 1970, с. 36—44.

25. Предупреждение загрязнения гидравлических систем «Machine Deijhn», 42, 1970, № 17, с. 102—106.

26. David J. H., Shell. — Выбор и установка гидравлических фильтров. Симпозиум «Fluid Power», М., 1976, с. 4—13.

27. Никитин Г. А., Чирков С. В. Влияние загрязненности жидкости на надежность работы гидросистем летательных аппаратов. — М.: Транспорт, 1969. — 183 с.

28. Проспект фирмы «Кульทรอนикс». Счетчик Культера, модель ТА II, 1977, с. 4.

29. Проспект «Millipore Analyzing Particulate Matter in Hydraulic Fluids and Oils», 1977, p. 4.

30. Прибор для автоматического контроля чистоты жидкости. — М.: Изд-во НИТИ, 1977, с. 4.

31. Проспект фирмы «Hiac»: Автоматическое оборудование для определения крупности и количества частиц. — М., 1977, с. 4.

32. Фильтр со сменными фильтрующими элементами ФОСН-60. — М.: ОНТИ объедин. Вторнефтепродукт, 1975. — 2 с.

33. Пузырев С. А., Неволин В. Ф. К вопросу о влиянии условий сушки на некоторые свойства бумаги, содержащей волокно виоло, ВНИИБ. — Труды института. Л., 1970, № 56, с. 17—24.

34. Пузырев С. А., Иншаков М. Д., Балмасов Е. Я., Зотова Н. Ф., Спановская Н. Ф. Испытание бумаги и картона. — М.: Лесная промышленность, 1966, с. 8—12.

35. Пузырев С. А. Бумага и картон как фильтрующие материалы. — М.: Лесная промышленность, 1970. — 86 с.

36. Шейдеггер А. Э. Физика течения жидкостей через пористые среды. — М.: Гостехиздат, 1960. — 246 с.

37. Кудряшов А. Ф., Волгин В. Д., Блановский А. Н. Определение экспериментального ряда распределения пор по размерам в пористых телах применительно к процессам фильтрации и ультрафильтрации. — Тр. МИХМ, вып. 1. М., 1974, с. 108—114.

38. Удлер Э. И., Шостак Л. Н. Определение основных структурных характеристик пористых фильтрационных материалов методом моделирования. Рукопись представлена ТИСИ. Деп. в ЦИНТИхимнефтемаш, 5 декабря 1979, № 538, 12 с.

39. Удлер Э. И., Рыбаков К. В., Шостак Л. Н., Бычков В. Е. Определение границ применимости линейного закона фильтрации в топливных и масляных фильтрах. — Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 1977, № 8, с. 16—19.
40. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. — М.: Изд-во АН СССР, 1955. — 186 с.
41. Пономарев Н. Н., Григорьев М. А., Борисова Г. В., Усанов Ю. А. Фильтры для очистки топлива и масла автомобильных и тракторных двигателей: Обзорная инф. — М.: НИИавтопром, 1979. — 41 с.
42. Нгуен Ван Тхам. Исследование процесса очистки углеводородных горючих фильтрационными материалами при переменной подаче. Дис. ... канд. техн. наук. — Л.: ВАТТ, 1976. — 189 с.
43. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1973. — 368 с.
44. Неволин В. Ф., Пузырев С. А. Влияние размера максимальных пор фильтрующей бумаги на тонкость фильтрации. — В кн.: Совершенствование пр-ва бумаги и картона. — М.: Лесная промышленность, 1973, с. 49—52.
45. Lewis W. K. Factor determining the capacity of filter press. — J. Ind. Chem., 4, 528 (1912).
46. Ruth B. F. Studies in Filtration. — Ind. Eng. Chem., 708, 806.
47. Hermans F. H., Bredy H. L. The complete theory and further, examples are there given. — Rec. trav. chem., 54, 680 (1955).
48. Минц Д. М. О взвешивании зернистого слоя. — ДАН, 1952, т. 82, № 17, с. 17—20.
49. Ives K. I. — Fluid Handling, 1962, 1950, p. 199—203.
50. Freshwater D. C. — Filtr. Separation, 1969, v. 6, № 2, p. 142—147.
51. Жужиков В. А. Фильтрование. — М.: Химия, 1971. — 439 с.
52. Шостак Л. Н., Удлер Э. И. О закономерностях процессов фильтрования топливных суспензий. Рукопись представлена ТИСИ. Деп. в ВИНТИ, сер. «Физика», 8 янв. 1980, с. 18, № 130-80.
53. Волков А. В., Солодов Д. Ф. Вопросы расчета параметров фильтрующей шторы фильтров тонкой очистки масел и топлив. — Тр. ЦНИДИ, Л., 1969, вып. 56, с. 152—170.
54. Романов В. Н., Песков В. А. К вопросу о выборе фильтров тонкой очистки дизельного топлива. — Научн. тр. УСХА, Киев, вып. 186, 1976, с. 19—25.
55. Фильтрующие элементы объединения «Вторнефтепродукт». ОНТИ объедин. — М.: Вторнефтепродукт, 1977. — 22 с.
56. Удлер Э. И., Рыбаков К. В., Зуев В. И. Гидравлический расчет гофрированного бумажного фильтра. — В кн.: Вопросы авиационной химмотологии. Киев: КИИГА, 1978, с. 54—58.
57. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. — М.: Наука, 1969. — 742 с.
58. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. — М.: Машиностроение, 1975. — 559 с.
59. Вулис Л. А., изд. АН СССР, ОТН, «Механика и машиностроение», № 3, 1962, с. 103—109.

60. Удлер Э. И., Рыбаков К. В., Зуев В. И. Оптимизация гофрированного бумажного фильтра. — В кн.: Вопросы авиационной химмотологии. Киев: КИИГА, 1978, с. 54—58.

61. Удлер Э. И. Вероятностная оценка показателей эффективности топливно-масляных фильтров волокнистого строения. — В кн.: Исследования механизации строительства и транспорта. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1982, с. 38—44.

62. Радушкевич Л. В. Статистическое описание структуры волокнистых фильтров. — ЖФХ, 1966, № 4, с. 965—966.

63. Чесаков В. Ф. Влияние шага фильтрующей шторы на показатели фильтров типа ЭТФ. — В кн.: Исследования по повышению надежности и срока службы деталей тракторов и сельскохозяйственных машин. Сб. науч. тр., Саратов, 1975, вып. 46, с. 143—148.

64. Удлер Э. И., Шостак Л. Н., Гренбек М. Г. Оптимизация звездообразных фильтров поверхностного типа для очистки нефтяных топлив и масел. Рукопись представлена ТИСИ. Деп. в ЦИНТИхимнефтемаш. 15 дек. 1980, 18 с., № 666.

65. Дьяков Р. А., Шкаренко В. А., Перельштейн Б. В. Испытания новых фильтроматериалов для тонкой очистки топлива. — Двигателестроение, 1981, № 1, с. 52—53.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава I. Назначение, сферы использования и конструкции фильтрующих элементов из бумаги и картона	
1.1. Загрязненность нефтяных топлив, масел и рабочих жидкостей гидравлических систем	5
1.2. Способы оценки загрязненности топлив и масел	27
1.3. Очистка топлив, масел и гидравлических жидкостей фильтрованием. Классификация фильтров-очистителей со сменными фильтрующими элементами	36
Глава II. Фильтровальные бумаги и картоны. Свойства и способы испытаний	
2.1. Бумага и картон как фильтровальные материалы	44
2.2. Основные показатели физико-механических свойств фильтровальных бумаг	49
2.3. Основные структурные характеристики фильтровальных материалов	53
Глава III. Гидравлические свойства и эффективные показатели фильтровальных бумаг и картонов	
3.1. Гидравлические свойства фильтровальных материалов в области линейной и нелинейной фильтрации	64
3.2. Эффективность фильтрования бумагами и картонами	73
3.3. Расчет показателей эффективности топливно-масляных фильтров	80
3.4. Закономерности фильтрации топлив и масел в пористых перегородках	89
Глава IV. Методы расчета и оптимизации фильтрующих элементов	
4.1. Общая характеристика и сравнение элементов по типу фильтрующей шторы	93
4.2. Гидравлический расчет фильтрующих элементов	102
4.3. Оптимизация выбора фильтровальных материалов и исходных конструктивных параметров	121
4.4. Оптимизация фильтрующих элементов по гидравлическим свойствам	123
4.5. Оптимизация фильтрующих элементов по ресурсу работы	129
Литература	135

Эдуард Исаакович УДЛЕР
Владимир Иванович ЗУЕВ

ФИЛЬТРУЮЩИЕ ТОПЛИВНО-МАСЛЯНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ
ИЗ БУМАГИ И КАРТОНА

Редактор Е. В. Лукина
Технический редактор Р. М. Подгорбунская
Корректор И. И. Глазкова

Издано. Сдано в набор 29.04.1983 г. Подписано к печати 15.12.1983 г.
К306294.
Формат 84×108¹/₃₂, бумага типографская № 3. Высокая печать.
Гарнитура Литературная. П. л. 4,4; уч-изд. л. 5,85; усл. п. л. 7,4.
Заказ 5269. Тираж 500. Цена 90 коп.

Издательство ТГУ. 634029. Томск, ул. Никитина, 4.
Типография издательства «Красное знамя», ул. Советская, 47.

1-539956

1 р. 10 к.

Томский госуниверситет 1878



Научная библиотека 01017821