

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЗМІСТУ І МЕТОДІВ НАВЧАННЯ  
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**І. К. Мотуз**

**ГІДРАВЛІКА І ГІДРАВЛІЧНІ МАШИНИ  
В ДОВІДКАХ І ТАБЛИЦЯХ**

Київ 1996

532  
МБ5

удк 621.65; 621.51; 621.63; 621.82 /075.8/; 532 /075.8/; 532 /5.01/

Мотуз І.К. Гідравліка і гідравлічні машини в довідках і таблицях / Навч.посібник для студентів енергомеханічних і технологічних спеціальностей. - К.: ІЗМН, 1996. - 260 с.

Викладені фізико-механічні властивості рідин харчових виробництв і деяких газів, які використовують у харчовій промисловості; основи гідростатики, гідродинаміки, технічної гідравліки, гідромашин і гідропривода. Наведений принцип розрахунку трубопроводів різного призначення, каналів, лотків тощо. Розглянуто відцентрові, роторні насоси і вентилятори, які використовують у харчовій промисловості і методи їх підбирання. Весь матеріал супроводжується довідковими таблицями і розрахунковими формулами. Наведено як технічні, так і експлуатаційні характеристики насосів і вентиляторів.

Призначено для студентів харчових вузів і технікумів при виконанні ними розрахунково-графічних, курсових і дипломних робіт. Можливо використовуватися робітниками харчової промисловості.

Іл. 114. Табл. 161. Бібліогр.: 34 назви.

Рецензенти: А.А.Цимбалюк, д-р техн.наук  
В.О.Штангеев, доцент

ISBN 5 - 7763 - 9692 - 1

© І.К.Мотуз, 1996

## ПЕРЕДМОВА

Сучасний стан розвитку окремих галузей техніки, в яких для технологічних цілей використовують рідини, що знаходяться в стані спокою або транспортуються по різних системах трубопроводів і каналів, вимагає від сучасного інженера знань законів спокою і руху рідин і працюючих за цими законами гідравлічних машин.

Щоб уявити собі значення гідравліки і гідравлічних машин в харчовій промисловості, достатньо навести такі дані. На цукровому заводі, який переробляє 6000 т цукрового буряку за добу, знаходиться в експлуатації більш як 350 одиниць насосно-компресорного обладнання, яке споживає 60...70% енергії, яку виробляють заводські генератори; на такому заводі монтується більше як 100 км металевих труб загальною масою понад 4500 т.

Все це вимагає від спеціаліста харчових виробництв не тільки вміти керувати виробництвом відповідно до вимог технології, а й забезпечувати її оптимальне проведення на високому технічному рівні, який відповідав би досягненням науки в даній області. В цьому йому допоможуть різні посібники, в яких викладаються сучасні технічні методи і рішення, засновані на теоретичних положеннях.

Запропонований навчальний посібник призначено для оперативного розв'язування задач у виробничих умовах. Головне його призначення - допомогти студентам вищих навчальних закладів і технікумів навчитися правильно вести розрахунки трубопроводів, насосних установок і гідроприводів, правильно підбирати насоси і вентилятори для забезпе-

чення того або іншого технологічного процесу. Може бути корисним і працівникам харчової промисловості, яка має свої специфічні особливості.

Посібник складається з чотирьох розділів: "Фізико-механічні властивості рідин"; "Гідростатика"; "Гідродинаміка"; "Гідравлічні машини". Кожний розділ має коротко наведений теоретичний матеріал, розрахункові формули і супроводжується довідковими таблицями та графіками. Довідкові дані подані в одиницях СІ. В доданках наведені таблиці співвідношення між СІ і системами одиниць МКС і СГС.

## Розділ I. ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ РІДИН

Рідина – це фізичне тіло, яке має властивість текучості, тобто не зберігає своєї форми, а приймає форму посудини, в якій знаходиться.

Рідини поділяють на крапельні і газоподібні /практично нестискувані і стискувані/.

Гідравліка розглядає ідеальну і реальну рідину.

Ідеальна – це така рідина, між частками якої немає сил зчеплення, внаслідок чого вона не чинить опору силам зсуву і розтягу. Ідеальна рідина зовсім не стискається, тобто чинить нескінченний опір силам стискування. Такої рідини в природі немає.

Реальні рідини не мають ідеальних властивостей, тобто вони до певної міри чинять опір дотичним і розтягуючим зусиллям, а також частково стискуються.

Закони, які складені для ідеальної рідини, можна застосовувати і для реальних рідин з відповідними поправками або без них.

### Питома вага. Густина

Питома вага – це вага одиниці об'єму рідкого тіла:

$$\gamma = \frac{P}{V}$$

л/

Одиниці питомої ваги		
СІ	СГС	МКГСС
Н/м <sup>3</sup>	дін/см <sup>3</sup>	кгс/м <sup>3</sup>

Густина - кількість маси рідини в одиниці об'єму

$$\rho = \frac{m}{V}$$

/2/

Одиниці густини		
СІ	СГС	МКГСС
кг/м <sup>3</sup>	г/см <sup>3</sup>	кгс·с <sup>2</sup> /м <sup>4</sup>

### Відносна питома вага і відносна густина

Відносною питомою вагою, або відносною густиною називають відношення питомої ваги /густини/ даного рідкого тіла до питомої ваги /густини/ дистильованої води при 4 °С:

$$\sigma = \frac{\gamma_p}{\gamma_{г.в}} = \frac{\rho_p}{\rho_{г.в}}$$

/3/

Далі наведено таблиці питомої ваги, густини і відносної густини рідин і газів, які зустрічаються в харчовій промисловості /табл. І-22/.

Таблиця І  
Питома вага і густина деяких крапельних рідин

Рідина	$\gamma$ , Н/м <sup>3</sup>	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	2	3
Вода прісна	9790	998,2
Вода морська	10010...10090	1002...1029
Гліцерин безводний	12260	1250
Газ	7770...8450	792...840

I	2	3
Бензин авіаційний	7250...7370	739...751
Олія рицинова	9520	970
Масило мінеральне	8600...8750	877...892
Нафта	8940...9320	850...950
Ртуть	132900	13547

Таблиця 2

Питома вага води  $\gamma'$  за різних температур,  
Н/м<sup>3</sup>

$t, ^\circ\text{C}$	$\gamma', \text{Н/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\gamma', \text{Н/м}^3$
0	9808,7	52	9682,5
4	9810,0	54	9678,6
6	9809,7	56	9674,6
10	9807,5	58	9650,1
12	9805,6	60	9647,0
14	9803,1	62	9640,3
16	9800,2	64	9613,8
18	9796,8	66	9608,9
20	9792,9	68	9603,0
22	9789,4	70	9593,6
24	9788,4	72	9591,2
25	9781,7	74	9561,8
26	9776,6	76	9554,9
28	9774,7	78	9549,1
30	9768,4	80	9534,7
32	9759,0	82	9509,8
34	9757,0	84	9502,9
36	9755,1	86	9495,1
38	9738,4	88	9488,2
40	9735,0	90	9481,4
42	9733,5	92	9444,1
44	9714,8	94	9436,2
46	9710,9	96	9427,4
48	9706,9	98	9420,5
50	9694,2	100	9404,7

Таблиця 3

Відносна питома вага вапняного молока

Кількість $CaO$ в 100 см <sup>3</sup> , г	$\delta$	Кількість $CaO$ в 100 см <sup>3</sup> , г	$\delta$
15,9	1,125	21,8	1,171
17,0	1,134	22,9	1,180
18,1	1,142	24,2	1,190
19,3	1,152	25,5	1,200
20,6	1,162	26,8	1,210

Таблиця 4

Відносна питома вага водних розчинів спиртів  
при температурі  $t = 15^{\circ}C$ 

Кількість спирту в роз- чині, %	$\delta_{15}^{\circ}$ водного розчину спирту			
	метилового	етилового	пропилового	ізопропило- вого
100	0,7960	0,7937	0,8076	0,7894
90	0,8242	0,8224	0,8307	0,8156
80	0,8507	0,8479	0,8514	0,8402
70	0,8752	0,8720	0,8717	0,8637
60	0,8979	0,8954	0,8920	0,8870
50	0,9186	0,9179	0,9125	0,9105
40	0,9373	0,9390	0,9329	0,9333
30	0,9537	0,9569	0,9532	0,9550
20	0,9682	0,9709	0,9721	0,9717
10	0,9795	0,9831	0,9851	0,9837

Таблиця 5

Густина паточної барди  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>

Кіль- кість су- хих речо- вин, %	Температура, $^{\circ}C$								
	20	30	40	50	60	70	80	90	95
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10,0	1039	1034	1030	1026	1021	1016	1010	1006	1005
30,9	1129	1124	1120	1113	1109	1104	1098	1093	1090

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
50,0	1216	1211	1206	1199	1193	1187	1181	1175	1172
61,0	1275	1269	1263	1258	1253	1245	1239	1234	1231
70,4	1330	1325	1319	1313	1305	1299	1293	1287	1285
79,5	1376	1370	1364	1358	1352	1343	1338	1338	1328

Таблиця 6

Густина метанової бражки  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>

$t$ , °C	Кількість СР, %					
	3,7	26,7	42,7	55,0	63,0	69,2
10	1025	1115	1200	1260	1315	1350
30	1015	1105	1190	1250	1300	1340
50	1005	1095	1175	1240	1290	1330
70	995	1080	1165	1225	1275	1315
90	985	1070	1150	1215	1265	1305

Таблиця 7

Густина деяких видів сировини кондитерського виробництва при  $t = 20$  °C

Продукт	Сухі речовини, %	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Продукт	Сухі речовини, %	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Ванілін	-	1056	Яйця курячі	-	1080...1090
Желатин	88,0	1368	Білок	13,5...15	1045
Мед <sup>к</sup>	70...82	1435	Жовток	46,5	1028...1030
Сіль кухонна	96,5	2160			

<sup>к</sup> При  $t = 15$  °C.

Таблиця 8

## Густина деяких мас кондитерського виробництва

Вид маси	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	Вид маси	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$
Ірисна	25	1400	Помадна	20	1392
Карамельна вологістю 2%	20	1600	Терта горіхо- ва	-	1005
	40	1570	Помадна цукро- ва	20	1397
	60	1540		Вершкова	-
	80	1500			
Карамельна вологістю 3...5%	20	1550			
	40	1520			
	60	1490			
	80	1460			

Таблиця 9

## Густина начинок

Начинка	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	Начинка	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$
Вишнева	-	1345	Прелінова	15	980
Полунична	-	1345	Вершкова	25	1440
Медина з вершками	-	1420	Фруктова	15	1375
Марципанова	-	1360	Яблучна	-	1417

Таблиця 10

Відносна густина цукрових розчинів залежно від концентрації  
і температури /по воді при  $\zeta = 4 \text{ }^\circ\text{C}/$

$\zeta, \text{ }^\circ\text{C}$	Кількість сухих речовин, %												
	0	10	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
0	1,000	1,040	1,108	1,132	1,157	1,183	1,210	1,238	1,266	1,296	1,326	1,357	1,390
10	1,000	1,040	1,106	1,130	1,155	1,181	1,207	1,234	1,262	1,292	1,322	1,353	1,385
20	0,996	1,038	1,104	1,127	1,152	1,177	1,203	1,230	1,258	1,287	1,317	1,349	1,381
30	0,996	1,035	1,100	1,124	1,148	1,173	1,199	1,226	1,254	1,285	1,313	1,344	1,378
40	0,992	1,032	1,096	1,120	1,144	1,169	1,194	1,221	1,249	1,278	1,308	1,339	1,371
50	0,988	1,028	1,092	1,115	1,139	1,164	1,189	1,216	1,244	1,273	1,302	1,334	1,365
60	0,983	1,023	1,087	1,110	1,134	1,158	1,184	1,210	1,238	1,267	1,297	1,328	1,360
70	0,978	1,018	1,081	1,104	1,128	1,152	1,178	1,205	1,232	1,261	1,291	1,322	1,354
80	0,972	1,012	1,075	1,098	1,122	1,146	1,171	1,199	1,226	1,255	1,285	1,315	1,347
90	0,965	1,005	1,069	1,092	1,115	1,140	1,165	1,192	1,220	1,248	1,278	1,309	1,341
100	0,958	0,998	1,062	1,085	1,108	1,133	1,158	1,185	1,213	1,241	1,272	1,302	1,334

Таблиця II

Залежність густини води  $\rho$  від температури

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$
0	999,9	52	987,0
4	1000,0	54	986,6
6	999,8	56	986,2
10	999,7	58	983,7
12	999,5	60	983,2
14	999,3	62	982,7
16	998,9	64	980,0
18	998,6	66	979,5
20	998,2	68	978,9
22	997,9	70	978,3
24	997,8	72	977,7
25	997,7	74	974,7
26	996,6	76	974,0
28	996,4	78	973,4
30	996,3	80	972,7
32	994,8	82	969,4
34	994,6	84	968,7
36	994,4	86	967,9
38	992,7	88	967,2
40	992,4	90	966,5
42	992,2	92	962,7
44	990,3	94	961,9
46	989,9	96	961,0
48	989,5	98	960,3
50	987,4	100	959,5

Олія	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Апельсинова	848...851 <sup>*</sup> 852...857 <sup>**</sup>
З арахісу	911...926
Кунжутна	921...925
З сої	922...934
З грецьких горіхів	925...927
З ліщини і фундука	913 <sup>***</sup>
Лимонна	850...870
З мигдалю	915...921
Соняшникова	925...927

\*З солодких апельсинів.

\*\*З гірких апельсинів.

\*\*\*При 20 °C.

Таблиця 13

Залежність густини незбираного молока  
від температури

Температура, °C	5	10	15	20	30
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1032,6	1031,7	1030,7	1028,7	1024,8
Температура, °C	40	50	60	70	80
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1020,9	1015,9	1011,1	1005,2	1000,3

Таблиця 14

Залежність густини вершків /жирність 35%/  
від температури

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$
5	1002,2	55	980,0
10	1002,2	60	974,0
15	996,9	65	971,0
20	993,9	70	965,0
25	991,5	75	964,0
30	988,0	80	962,0
35	985,0	85	960,0
40	983,0	90	960,0
45	982,0	95	960,0
50	980,0	100	960,0

Таблиця 15

Густина натурального томатного соку  
залежно від температури і кількості  
сухих речовин

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$ , при кількості сухих речовин						
	4,29	8,07	12,4	16,07	20,22	25,22	30,04
20	1030	1046	1061	1078	1120	1121	1141
30	1023	1038	1055	1070	1097	1118	1137
40	1017	1033	1048	1065	1090	1109	1130
50	1011	1027	1043	1061	1084	1102	1124
60	1008	1022	1038	1055	1080	1098	1118
70	1000	1015	1030	1048	1072	1090	1113
80	997	1009	1022	1041	1062	1088	1105

Таблиця 16

Залежність густини соку з яблук від кількості сухих речовин при 20 °С

Кількість сухих речовин, %	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Кількість сухих речовин, %	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Кількість сухих речовин, %	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
9,8	1030	30,0	1124	54,7	1227
12,8	1048	33,0	1144	56,6	1272
15,0	1063	34,0	1146	57,5	1275
18,0	1077	36,5	1179	61,0	1301
20,0	1080	46,5	1220	62,4	1308
22,4	1086	46,0	1223	-	-
24,0	1086	48,5	1223	-	-
26,4	1109	61,5	1225	-	-

Густину соку з яблук при 20 °С залежно від кількості сухих речовин /%/ можна визначити за формулою

$$\rho_{20^{\circ}} = 510 \left( \frac{CP}{100} \right) + 981 \text{ кг/м}^3. \quad /4/$$

Таблиця 17

Залежність густини виноградного соку від концентрації і температури

$t, ^{\circ}\text{C}$	$\rho$ /кг/м <sup>3</sup> / при кількості сухих речовин, %						
	15	20	30	40	50	60	70
1	2	3	4	5	6	7	8
0	1065	1088	1138	1185	1242	1300	1373
10	1065	1065	1132	1180	1237	1295	1368
20	1056	1081	1127	1176	1232	1290	1361
30	1052	1076	1124	1173	1228	1283	1355
40	1050	1075	1121	1168	1225	1278	1350
50	1048	1071	1116	1162	1220	1275	1342
60	1045	1067	1112	1156	1215	1268	1334
70	1040	1062	1108	1150	1210	1262	1326

Густину виноградного соку можна визначити за формулою

$$\rho = 969 + 571,5 \frac{CP}{100} - \left( 25 + 42 \frac{CP}{100} \right) \frac{t}{100} \text{ кг/м}^3, \quad /5/$$

де CP - кількість сухих речовин, %;  $t$  - температура соку, °C.

Таблиця 18

Густина молока, склотини і сироватки

Продукт	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$
Молоко:		
незбиране	15	1031
обезжирене	15	1036
згущене з цукром	-	1280
згущене обезжирене	-	1100
Склотини	15	1032
Сироватка	15	1027

Таблиця І9

Густина  $\rho$  суслу і пива "Жигулівське", кг/м<sup>3</sup>

Продукт	Температура, °C									
	2	5	10	20	30	40	50	60	70	75
Сусло незахмелене /16,5% екстрактивних речовин/	-	-	-	1067,6	-	1060,9	-	1051,7	1046,2	1043,3
Сусло захмелене /11% екстрактивних речовин/	-	1046,5	1046,1	1044,1	-	1037,8	-	1028,8	1023,6	1022,6
Пиво /5,5% екстракту, 2,9% спирту/	1018,6	1018,6	1018,4	1016,9	1014,4	-	1008,4	-	1000,1	1000,1

Залежність питомої ваги і густини сухого повітря  
від температури при атмосферному тиску

$t, ^\circ\text{C}$	$\gamma, \text{H/м}^3$	$\rho, \text{кг/м}^3$
-50	15,04	1,534
-20	13,40	1,365
0	12,28	1,252
10	11,82	1,206
20	11,42	1,164
30	11,04	1,127
40	10,72	1,092
50	10,36	1,056
60	10,06	1,025
70	9,76	0,996
80	9,50	0,968
90	9,24	0,942
100	8,98	0,916
120	8,53	0,870
140	8,11	0,827
160	7,74	0,789
180	7,41	0,755
200	7,09	0,723
300	5,84	0,596
400	4,98	0,508
500	4,41	0,450
600	3,92	0,400
800	3,166	0,325
1000	2,63	0,268

Таблиця 21

Питома вага ↗ газів /Н/м<sup>3</sup>/ залежно від температури

Газ	Температура, °С								
	0	20	40	50	60	70	80	90	100
Повітря	12,680	11,820	11,070	10,720	10,400	10,090	9,800	9,540	9,280
Кисень	14,020	13,060	12,220	11,850	11,500	11,150	10,840	10,540	10,260
Азот	12,270	11,440	10,700	10,370	10,070	9,770	9,490	9,230	8,990
Вуглекислий	19,390	18,070	16,910	16,390	15,900	15,440	15,000	14,590	14,200
Кислоти: сірчаної	28,720	26,760	25,050	24,280	23,540	22,860	22,210	21,600	21,020
Сатураційний	14,700	13,680	12,820	12,420	12,050	11,690	11,370	11,060	10,750
Сірчаний на сульфітації	14,260	13,310	12,460	12,080	11,710	11,360	11,050	10,740	10,460
Гелій	1,756	1,636	1,532	1,484	1,439	1,397	1,358	1,320	1,290
Аргон	17,490	16,300	15,250	14,780	14,330	13,920	13,530	13,150	12,800
Водень	0,883	0,823	0,770	0,746	0,724	0,703	0,683	0,664	0,646
Окис вуглець	12,260	11,420	10,690	10,360	10,050	9,760	9,480	9,220	8,970
Метан	7,033	6,550	6,130	5,940	5,770	5,600	5,440	5,290	5,150
Етилен	12,270	11,430	10,700	10,370	10,060	9,770	9,490	9,230	8,980
Коксовий	5,052	4,710	4,410	4,270	4,140	4,020	3,910	3,800	3,700
Аміак	7,563	7,050	6,600	6,390	6,200	6,020	5,850	5,690	5,540

Густина  $\rho$  газів /кг/м<sup>3</sup>/ залежно від температури

Газ	Температура, °C								
	0	20	40	50	60	70	80	90	100
Повітря	1,293	1,205	1,234	1,093	1,060	1,029	0,999	0,972	0,946
Кисень	1,429	1,331	1,246	1,208	1,172	1,137	1,105	1,074	1,046
Азот	1,251	1,166	1,091	1,057	1,027	0,996	0,967	0,941	0,916
Вуглекислий	1,977	1,842	1,724	1,671	1,621	1,574	1,529	1,487	1,448
Кислоти сірчаної	2,928	2,728	2,554	2,475	2,399	2,330	2,264	2,202	2,143
Сатураційний	1,496	1,394	1,307	1,266	1,228	1,192	1,159	1,127	1,096
Сірчаний на сульфитації	1,456	1,357	1,270	1,231	1,194	1,158	1,126	1,095	1,066
Гелій	0,179	0,167	0,156	0,151	0,147	0,142	0,138	0,135	0,131
Аргон	1,783	1,662	1,554	1,511	1,461	1,419	1,379	1,340	1,304
Водень	0,090	0,084	0,078	0,076	0,074	0,072	0,069	0,068	0,066
Окис вуглецю	1,250	1,164	1,090	1,056	1,024	0,995	0,966	0,940	0,914
Метан	0,717	0,668	0,625	0,606	0,588	0,571	0,555	0,539	0,525
Етилен	1,251	1,165	1,091	1,057	1,025	0,996	0,967	0,941	0,915
Ноксовий	0,515	0,480	0,450	0,435	0,422	0,411	0,399	0,387	0,377
Аміак	0,771	0,719	0,673	0,651	0,632	0,614	0,596	0,580	0,565

Питому вагу газів можна визначити для довільної температури, використовуючи залежність

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \frac{1}{273}t}, \quad /6/$$

де  $\rho_0$  - питома вага газу при 0 °C і атмосферному тиску;  $t$  - температура.

#### Температурне розширення

Температурним коефіцієнтом об'ємного розширення рідини називається число, яке показує відносну зміну об'єму рідини при зміні температури на 1 °C /табл.23, 24/:

$$\beta_t = \frac{V - V_0}{V_0} \frac{1}{t - t_0}, \quad /7/$$

де  $V_0$  - первинний об'єм;  $V$  - об'єм після розширення;  $t_0$  - первинна температура;  $t$  - температура нагрівання.

Таблиця 23

Температурний коефіцієнт об'ємного розширення

$\beta_t$  води, 1/°C

Тиск, МПа	Температура, °C				
	1...10	10...20	40...50	60...70	90...100
0,1	0,000014	0,000150	0,000422	0,000556	0,000719
9,8	0,000043	0,000166	0,000422	0,000548	0,000714
19,6	0,000072	0,000183	0,000426	0,000539	-
49,0	0,000149	0,000236	0,000429	0,000523	0,000661
80,3	0,000229	0,000294	0,000437	0,000514	0,000621

Коефіцієнт об'ємного розширення  $\beta_t \cdot 10^3$  рідких речовин і водних розчинів залежно від температури

Речовина	Температура, °C						
	0	20	40	60	80	100	120
Аміак рідкий	2,15	2,42	2,80	3,20	4,30	6,20	14,50
Анілін	0,83	0,84	0,66	0,88	0,91	0,95	1,01
Бутиловий спирт	0,85	0,88	0,91	0,94	0,98	1,03	1,09
Вода	0,06	0,21	0,39	0,53	0,63	0,75	0,86
Ізопропиловий спирт	1,01	1,05	1,08	1,12	1,16	1,20	1,27
Метиловий спирт	1,14	1,19	1,27	1,30	1,42	1,61	1,81
Кальцій хлорний, 25 %-ний розчин	0,35	0,39	0,43	0,46	0,49	0,51	0,55
Натрій хлорний, 20 %-ний розчин	0,36	0,41	0,46	0,5	0,54	0,58	0,62
Оцтова кислота	1,05	1,07	1,11	1,14	1,18	1,23	1,30
Чотирихлорний вуг- лець	1,18	1,22	1,26	1,32	1,37	1,50	1,62
Етиловий спирт	1,05	1,08	1,13	1,22	1,33	1,44	1,67

Середнє значення  $\beta_t$  для інших рідин, 1/°C: газ - 0,0010; гліцерин - 0,0005; нафта - 0,0007; ртуть - 0,000182.

### Стислість рідини

Коефіцієнтом об'ємного стискання  $\beta_V$  називають число, яке дорівнює відношенню відносного змінення об'єму рідини до зміни тиску /табл.25/:

$$\beta_V = - \frac{dV}{V_0} \cdot \frac{1}{dp}, \quad /8/$$

де  $\beta_V$  - модуль стислості, м<sup>2</sup>/Н;  $dV$  - елементарне змінення об'єму, м<sup>3</sup>;  $V_0$  - початковий об'єм рідини, м<sup>3</sup>;  $dp$  - елементарна зміна тиску, Па.

Коефіцієнт об'ємного стиснення  $\beta_V \cdot 10^6$  води,  
м<sup>2</sup>/Н

$t, ^\circ\text{C}$	Тиск, МПа				
	0,5	1,0	2,0	3,9	7,8
0	5,40	5,37	5,31	5,23	5,15
5	5,29	5,23	5,18	5,08	4,93
10	5,23	5,18	5,08	4,98	4,81
15	5,19	5,10	5,03	4,88	4,70
20	5,15	5,05	4,95	4,81	4,60

Величина, обернена коефіцієнтові об'ємного стиснення  $\beta_V$ , на-  
зивається модулем об'ємної пружності рідини  $E_o$ :

$$E_o = 1/\beta_V. \quad /9/$$

Значення модуля пружності води наведено в табл.26, 27.

Таблиця 26

Модуль об'ємної пружності води  $E_o$ , МПа

$t, ^\circ\text{C}$	$E_o$ при тиску, МПа				
	0,5	1,0	2,0	3,9	7,8
0	1854	1864	1884	1913	1972
5	1893	1913	1933	1972	2031
10	1913	1933	1972	2011	2080
15	1933	1962	1991	2050	2129
20	1942	1982	2021	2080	2178

Таблиця 27

Модуль об'ємної пружності  $E_o$  низки рідин  
при  $t = 50 ^\circ\text{C}$ , МПа

Рідина	$E_o$
Вода	2096
Газ	1373

I	2
Турбінне мастило	1716
Силіконова	1030
Мастило АМГ-10	1304
Дизельне паливо	1324

На відміну від крапельних рідин газів характеризуються значною стисливістю і високим коефіцієнтом температурного розширення. Залежність густини газів від тиску і температури встановлюється рівнянням стану. Для досконалих газів застосовують рівняння Клапейрона

$$\rho = \frac{p}{R T} \quad /10/$$

де  $\rho$  - абсолютний тиск;  $R$  - газова стала, різна для різних газів, але не залежить від температури і тиску;  $T$  - абсолютна температура.

Для повітря

$$\rho = \rho_0 \frac{p}{p_0} \frac{T}{T_0} \quad /11/$$

На графіку рис.1 показані криві зміни густини повітря за формулою /11/ в функції температури при різних тисках.

У табл.28 наведена газова стала деяких газів за нормальних умов.

Таблиця 28

Газова стала найважливіших газів за нормальних умов

Газ	$R$ , Дж/(кг·К)
1	2
Повітря	287,0
Кисень	259,6
Азот	296,8
Гелій	2076,0
Аргон	208,2
Водень	4124,0
Окис вуглецю	296,6

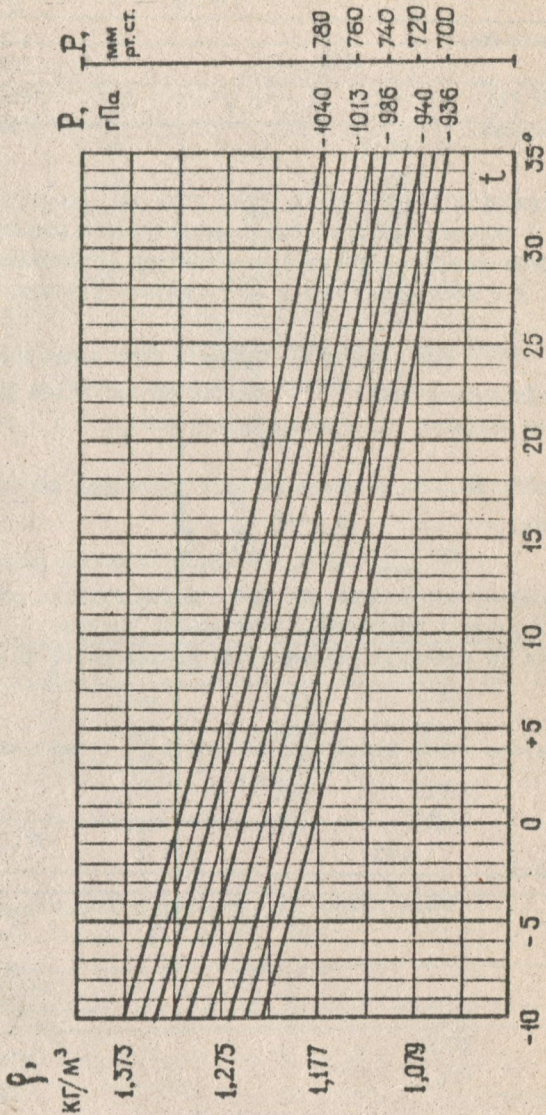


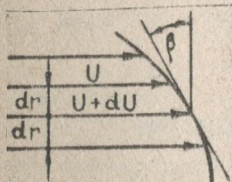
Рис.1. Змінення густини повітря залежно від температури при різних тисках

	1	2
Двоокис вуглецю		188,9
Сірчаний газ		129,8
Метан		518,8
Етилен		296,6
Коксовий		721,0
Аміак		488,3

### В'язкість

В'язкістю називають властивість рідини чинити опір зсуву.

Розглянемо потік рідини, всі шари якого рухаються паралельно /рис.2/. Швидкість від шару до шару змінюється відповідно до епюри швидкостей. На рис.2:  $dr$  - товщина шару;  $\frac{du}{dr}$  - градієнт швидкості, який



визначається тангенсом кута нахилу дотичної до епюри швидкостей у розглядуваній точці /  $\tan \beta$  / і характеризує інтенсивність зміни швидкості в напрямі, перпендикулярному до неї.

Сила внутрішнього тертя між шарами

$T$  не залежить від тиску в рідині і пропорційна поверхні дотикання шарів  $F$ , відносній швидкості їх переміщення і

залежить від роду рідини. Ця сила визначена Ньютоном:

$$T = \mu F \frac{du}{dr}, \quad (12)$$

де  $\mu$  - коефіцієнт абсолютної або динамічної в'язкості.

Напруження сил внутрішнього тертя

$$\tau = \frac{T}{F} = \mu \frac{du}{dr}. \quad (13)$$

При  $\frac{du}{dr} = 1$   $\tau = \mu$ , тобто в'язкість рідини - це напруження сил внутрішнього тертя.

Відношення абсолютної в'язкості до густини називають кінематичною в'язкістю:

$$\gamma = \frac{\mu}{\rho} \quad /14/$$

В'язкість	Розмірність у системі		
	СІ	СГС	МКСС
Динамічна	Па · с (кг/м · с)	г/см · с	кгс · с/м <sup>2</sup>
Кінематична	м <sup>2</sup> /с	см <sup>2</sup> /с	м <sup>2</sup> /с

Для визначення в'язкості води при довільній температурі використовують формулу Пуазейля:

$$\gamma = \frac{1,775}{1 + 0,0337 \cdot t + 0,000221 \cdot t^2} \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}, \quad /15/$$

де  $t$  - температура.

Таблиця 29

В'язкість деяких олій залежно від температури

Олія	$\gamma \cdot 10^6$ /м <sup>2</sup> /с/ при температурі, °С					
	20	40	60	80	100	150
Виноградна з кісточок	57,6	25,0	11,2	5,4	3,0	1,2
Кукурудзяна	72,3	30,5	14,6	6,9	4,7	2,0
Кунжутна	55,6	32,4	14,8	7,1	5,0	2,1
Соняшникова	59,8	26,2	11,3	6,2	3,3	1,6
З сої	61,8	30,6	16,1	10,7	7,4	2,8
Бавовняна	73,4	33,8	18,7	11,6	7,8	3,7

Таблиця 30

Динамічна в'язкість густого сиропу  $\mu$  /Па · с/ залежно від температури

CP = 65

Дб = 92

$t, ^\circ\text{C}$	50	55	60	65	70	75	80	85	90
$\mu \cdot 10^2$	1,71	1,40	1,16	1,01	0,86	0,74	0,64	0,57	0,49

Таблиця 31

Динамічна в'язкість білої патоки  $\mu$  /Па·с/ залежно від температури

CP = 76

Дб = 78

$t, ^\circ\text{C}$	50	55	60	65	70	75	80	85	90
$\mu \cdot 10$	2,25	1,85	1,30	1,07	0,83	0,68	0,51	0,40	0,31

Таблиця 32

Динамічна в'язкість зеленої патоки  $\mu$  /Па·с/ залежно від температури

CP = 80

Дб = 78

$t, ^\circ\text{C}$	50	55	60	65	70	75	80	85	90
$\mu \cdot 10$	8,1	5,80	4,40	3,88	2,39	1,82	1,24	0,86	0,53

Таблиця 33

Динамічна в'язкість меляси  $\mu$  /Па·с/ залежно від температури

CP = 85

Дб = 78

$t, ^\circ\text{C}$	20	30	40	45	50	55
$\mu$	10,4	8,85	5,70	4,11	2,59	1,58
$t, ^\circ\text{C}$	60	65	70	75	80	90
$\mu$	1,14	0,884	0,695	0,632	0,599	0,523

Таблиця 34

Динамічний і кінематичний коефіцієнти в'язкості води залежно від температури

$t, ^\circ\text{C}$	$\mu \cdot 10^3$ Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu \cdot 10^3$ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с
1	2	3	4	5	6
0	1,79	1,79	4	1,56	1,56
1	1,73	1,73	5	1,52	1,52
2	1,67	1,67			
3	1,62	1,62	6	1,47	1,47

1	2	3	4	5	6
7	1,43	1,43	43	0,621	0,627
8	1,39	1,39	44	0,610	0,616
9	1,35	1,35	45	0,599	0,600
10	1,31	1,31	46	0,588	0,594
11	1,27	1,27	47	0,578	0,584
12	1,24	1,24	48	0,568	0,574
13	1,20	1,20	49	0,559	0,565
14	1,17	1,171	50	0,549	0,556
15	1,14	1,141	51	0,540	0,546
16	1,11	1,111	52	0,532	0,539
17	1,09	1,09	53	0,523	0,530
18	1,06	1,061	54	0,515	0,522
19	1,03	1,04	55	0,506	0,512
20	1,01	1,01	56	0,499	0,506
21	0,98	0,981	57	0,491	0,499
22	0,96	0,962	58	0,483	0,491
23	0,94	0,942	59	0,476	0,484
24	0,91	0,912	60	0,469	0,477
25	0,894	0,896	61	0,462	0,470
26	0,874	0,877	62	0,455	0,463
27	0,855	0,858	63	0,448	0,456
28	0,836	0,839	64	0,442	0,451
29	0,818	0,821	65	0,436	0,445
30	0,801	0,804	66	0,429	0,438
31	0,784	0,788	67	0,423	0,432
32	0,768	0,772	68	0,417	0,426
33	0,752	0,756	69	0,412	0,421
34	0,737	0,741	70	0,406	0,415
35	0,723	0,730	71	0,401	0,410
36	0,709	0,713	72	0,395	0,404
37	0,695	0,700	73	0,390	0,399
38	0,681	0,686	74	0,385	0,395
39	0,669	0,674	75	0,380	0,390
40	0,656	0,661	76	0,375	0,385
41	0,644	0,649	77	0,370	0,380
42	0,632	0,637	78	0,366	0,376

1	2	3	4	5	6
79	0,361	0,371	90	0,317	0,328
80	0,357	0,367	91	0,313	0,324
81	0,352	0,362	92	0,310	0,322
82	0,348	0,359	93	0,306	0,318
83	0,344	0,355	94	0,303	0,315
84	0,340	0,351	95	0,299	0,311
85	0,336	0,347	96	0,296	0,308
86	0,332	0,343	97	0,293	0,305
87	0,328	0,339	98	0,290	0,302
88	0,324	0,335	99	0,287	0,299
89	0,320	0,331	100	0,284	0,296

Таблиця 35

Динамічний коефіцієнт в'язкості  $\mu_0$  чистих спиртів,  
Па·с

$t, ^\circ\text{C}$	$\mu_0$ для спиртів			
	метилового	етилового	пропилового	ізопропилового
0	0,00081	0,00177	0,00388	0,00456
10	0,00069	0,00145	0,00292	0,00325
20	0,00059	0,00119	0,00226	0,00237
30	0,00052	0,00099	0,00178	0,00176
40	0,00045	0,00083	0,00140	0,00133
50	0,00040	0,00070	0,00113	0,00103
60	0,00035	0,00059	0,00092	0,00080
70	-	0,00050	0,00076	0,00064
80	-	-	0,00063	0,00052

Таблиця 36

## В'язкість цукрових розчинів, Па·с

Доброякіс- ність	Кількість сухих речовин, %					
	76	78	80	82	84	86
Температура 40 °C						
60	0,435	0,806	1,690	3,960	11,2	40,0
70	0,456	0,863	1,830	4,340	12,4	-
80	0,480	0,919	1,990	4,710	13,6	-
90	0,503	0,977	2,120	5,080	14,8	-
100	0,526	1,030	2,260	5,450	16,0	-
Температура 80 °C						
60	0,049	0,073	0,115	0,199	0,383	0,844
70	0,050	0,075	0,118	0,205	0,396	0,883
80	0,051	0,076	0,120	0,210	0,408	0,922
90	0,051	0,078	0,123	0,216	0,421	-
100	0,052	0,078	0,125	0,222	0,434	-

Залежність в'язкості  $\mu \cdot 10^2$  сусла і пива "Жигулівське"  
від температури, Па·с

Продукт	Температура, °C									
	2	5	10	20	30	40	50	60	70	75
Сусло незахмелене /16,5% екстрактивних речовин/	-	-	-	0,2410	-	0,1530	-	0,1115	0,0955	0,0790
12 Сусло захмелене /11% екстрактивних речовин/	-	0,2890	0,2520	0,1860	-	0,1196	-	0,0895	0,0769	0,0721
Пиво /5,5% екстракту, 2,9% спирту/	0,2816	0,2410	0,2010	0,1451	0,1180	-	0,0780	-	0,0520	0,0481

Таблиця 38

В'язкість  $\mu \cdot 10^2$  паточної барди залежно від температури і кількості сухих речовин, Па·с

Кількість сухих речовин, %	Температура, °C							
	20	30	40	50	60	70	80	90
10,0	0,137	0,108	0,087	0,073	0,061	0,053	0,048	0,044
30,9	0,360	0,271	0,208	0,172	0,146	0,126	0,112	0,112
50,0	1,631	1,131	0,687	0,513	0,401	0,324	0,275	0,247
61,0	7,109	4,181	2,816	1,850	1,355	1,037	0,869	0,765
70,4	65,114	33,085	17,481	10,707	6,007	4,067	2,567	1,944
79,5	1754,200	604,365	234,160	95,497	50,198	33,505	27,024	13,815

Залежність в'язкості  $\mu \cdot 10^{-3}$  метанової бражки  
від концентрації і температури, Па·с

Кількість сухих речовин, %	Температура, °C			
	20	40	60	80
3,7	1,6	1,0	0,75	0,60
10,8	1,9	1,4	0,96	0,74
26,7	4,8	3,0	1,90	1,40
31,7	7,2	4,3	2,70	1,85
42,7	18,0	9,8	5,90	4,00
55,0	95,0	42,0	20,0	11,00
63,0	320,0	115,0	55,00	29,00
69,2	-	420,0	140,0	77,00

Таблиця 40

Залежність в'язкості олії какао від  
температури, Па·с

$t, ^\circ\text{C}$	$\mu$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu$
35	0,0520	50	0,0278	65	0,0192
40	0,0383	55	0,0249	70	0,0158
45	0,0349	60	0,0206	75	0,0154

Таблиця 41

Залежність в'язкості начинок від температури

Начинка	Сухі речо- вини, %	Загальний цукор, %	Кислот- ність, %	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu, \text{Па}\cdot\text{с}$
1	2	3	4	5	6
Вишнева	82,50	71,80	0,56	21	400,4
			0,62	55	14,4
Кизилова	82,70	73,30	0,65	20	385,2
				32	106,3
				47	31,3
				62	6,0
Малинова	81,00	75,60	-	35	39,0
З горобини	82,40	74,00	0,90	22	359,5

Закінчення табл.41

I	2	3	4	5	6
З чорної смо- родини	82,00	72,20	0,70	26	410,0
				50	25,3
				68	6,3
Яблучна	86,00	75,20	0,53	23	503,0
				50	57,0

Таблиця 42

Значення в'язкості молока, сколотин і сироватки

Продукт	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu \cdot 10^4, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\gamma \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$
Молоко:			
незбиране	15	18,04	1,754
обезжирене	15	17,36	1,680
згущене з цукром	-	12454,00	973,000
згущене обезжирене	-	4903,00	446,000
Сколотини	15	16,67	1,615
Сироватка	15	16,47	1,611

Таблиця 43

Залежність в'язкості незбираного молока від температури

Температура, $^\circ\text{C}$	$\mu \cdot 10^2, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\gamma \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$
5	0,296	2,87
10	0,247	2,39
15	0,210	2,04
20	0,179	1,74
30	0,133	1,30
40	0,104	1,02
50	0,085	0,84
60	0,071	0,70
70	0,062	0,62
80	0,057	0,57

Залежність в'язкості вершків /жирність 35%/  
від температури

$t, ^\circ\text{C}$	$\mu \cdot 10^7, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu \cdot 10^7, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$
5	7845,30	78,40	55	252,03	2,57
10	3922,60	39,20	60	250,06	2,57
15	1716,16	17,20	65	247,12	2,54
20	1176,79	11,80	70	245,16	2,54
25	882,59	8,90	75	245,16	2,54
30	686,46	7,00	80	245,16	2,54
35	539,36	5,50	85	244,16	2,54
40	441,29	4,50	90	243,20	2,53
45	392,26	4,20	95	242,22	2,52
50	254,97	2,60	100	240,26	2,50

В'язкість вершків /з точністю  $\pm 7\%$ / в інтервалі температур 40...70  $^\circ\text{C}$  при кількості жиру  $\mathcal{J} = 20...40\%$  можна визначити за формулою, Па·с:

$$\mu = (0,29 \mathcal{J}^2 \cdot t^{-1,16}) \cdot 10^{-3}. \quad /16/$$

Для  $t = 20...30$   $^\circ\text{C}$  і тієї самої жирності вершків, Па·с:

$$\mu = (0,0092 \mathcal{J}^{2,7} \cdot t^{-0,84}) \cdot 10^{-3}. \quad /17/$$

Таблиця 45

В'язкість натурального томатного соку залежно від температури і кількості сухих речовин, Па·с

$t, ^\circ\text{C}$	$\mu$ при кількості сухих речовин, %							
	4,62	6,35	10,8	11,2	13,5	14,0	17,6	25,0
30	0,060	0,095	0,410	0,450	0,700	1,00	2,50	4,30
40	0,050	0,075	0,320	0,360	0,520	0,75	1,80	3,20
50	0,025	0,050	0,240	0,265	0,405	0,70	1,40	2,10
60	0,015	0,045	0,175	0,200	0,290	0,50	1,00	1,70
70	0,010	0,030	0,140	0,170	0,205	0,40	0,65	1,15
80	0,005	0,025	0,110	0,130	0,185	0,25	0,50	1,05

В'язкість томатного соку при кількості сухих речовин  $CP$  і при температурі  $t^{\circ}$  можна визначити за формулою, Па.с:

$$\mu = 0,0199 \cdot CP^{2,94} \cdot t^{-1,17} \quad /18/$$

Таблиця 46

Динамічні коефіцієнти в'язкості рідких речовин  
і водяних розчинів залежно від температури,  
МПа · с

Речовина	Температура, $^{\circ}C$					
	0	20	40	60	80	100
Аміак рідкий	0,244	0,226	0,208	0,190	-	-
Аміачна вода, 25%	-	1,300	0,855	0,600	0,420	0,320
Анілін	10,200	4,400	2,300	1,500	1,100	0,800
Бутиловий спирт	5,190	2,950	1,780	1,140	0,760	0,540
Ізопропиловий спирт	4,60	2,390	1,330	0,800	0,520	0,380
Метиловий спирт:						
100%	0,817	0,584	0,450	0,351	0,290	0,240
40%	3,650	1,840	-	-	-	-
Кальцій хлорний 25%-ний розчин	4,470	2,740	1,850	-	-	-
Натрій хлорний 20%-ний розчин	2,670	1,560	1,030	0,740	0,570	0,460
Оцтова кислота:						
100%	-	1,220	0,900	0,700	0,560	0,460
50%	4,350	2,210	1,350	0,920	0,650	0,500
Чотиріххлорний вуглець	1,350	0,970	0,740	0,590	0,472	0,387
Етиловий спирт, %:						
100	1,780	1,190	0,825	0,591	0,435	0,326
80	3,690	2,010	1,200	0,790	0,570	0,520
60	5,750	2,670	1,450	0,900	0,600	0,450
40	7,140	2,910	1,480	0,890	0,600	0,440
20	5,320	2,180	1,160	0,740	0,510	0,380

Таблиця 47

Залежність в'язкості виноградного соку від температури і кількості сухих речовин, Па·с

$t, ^\circ\text{C}$	$\mu$ при кількості сухих речовин, %			
	20	30	40	50
0	0,0040	0,0065	0,0150	0,0480
5	0,0032	0,0054	0,0117	0,0370
10	0,0026	0,0043	0,0092	0,0280
15	0,0023	0,0037	0,0075	0,0200
20	0,0020	0,0032	0,0062	0,0150
25	0,0017	0,0028	0,0052	0,0120

Таблиця 48

Динамічний і кінематичний коефіцієнти в'язкості деяких газів

Найменування газу	$t, ^\circ\text{C}$	$\mu \cdot 10^5, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^5, \text{м}^2/\text{с}$
Повітря	15	1,81	1,45
Водень	15	0,89	9,45
Гелій	15	1,92	10,60
Кисень	15	1,95	0,14
Вуглекислий газ	15	1,45	0,72
Метан	20	1,05	-

Таблиця 49

Кінематична в'язкість повітря при атмосферному тиску,  $\text{м}^2/\text{с}$

$t, ^\circ\text{C}$	$\nu \cdot 10^6$	$t, ^\circ\text{C}$	$\nu \cdot 10^6$	$t, ^\circ\text{C}$	$\nu \cdot 10^6$	$t, ^\circ\text{C}$	$\nu \cdot 10^6$
-180	1,76	0	13,70	50	18,60	100	23,78
-150	3,10	10	14,70	60	19,60	120	26,20
-100	5,94	20	15,70	70	20,45	140	28,45
-50	9,54	30	16,61	80	21,70	160	30,60
-20	11,93	40	17,60	90	22,90	180	33,17

## Течія ньютонівських рідин

Для звичайних, або ньютонівських, рідин залежність між напруженням зсуву  $\tau$  і градієнтом швидкості  $\frac{dU}{dr}$  виражається відповідно до рівняння [13] прямою, яка проходить через початок координат. Тангенс кута нахилу цієї прямої дорівнює в'язкості  $\mu$  /рис.3, крива 1/. В'язкість ньютонівських рідин за даної температури і

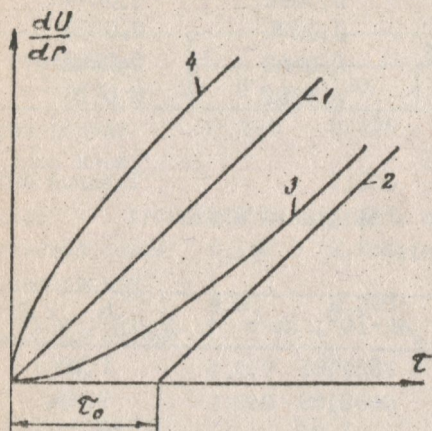


Рис.3. Криві течії

$\frac{dU}{dr} = f(\tau)$  не залежить від часу: а/ бінгамівські пластичні; б/ псевдопластичні і в/ ділатантні.

Бінгамівські пластичні рідини при малих напруженнях зсуву лише трохи деформуються і починають текти тільки при збільшенні  $\tau$  до деякого значення  $\tau_0$ , яке називається границею текучості. При  $\tau > \tau_0$  бінгамівські рідини течуть подібно ньютонівським. При зменшенні напруження до  $\tau < \tau_0$  структура бінгамівської рідини відновлюється. До цих рідин відносять густі суспензії, пасті. Рівняння кривої течії має вигляд

$$\tau - \tau_0 = \mu_n \frac{dU}{dr}, \quad /19/$$

де  $\mu_n$  - коефіцієнт пропорційності, який називають пластичною в'язкістю.

тиску не лишається сталою, а змінюється залежно від швидкості зсуву, його тривалості, а також від конструкції апарата. Тому залежність  $\tau$  від  $\frac{dU}{dr}$  для ньютонівських рідин є криволінійною. Види цих залежностей, які називаються кривими течії, відрізняються для ньютонівських рідин різних типів.

Ньютонівські рідини можна поділити на три великі групи.

До першої групи відносять рідини, для яких

Залежність /19/ на рис.3 зображена кривою 2 з тангенсом кута нахилу  $\operatorname{tg} \alpha = \mu_r$ .

Псевдопластичні рідини починають текти, як і ньютонівські вже при малих значеннях  $\xi$ . Однак для цих рідин відношення напруження зсуву до градієнта швидкості, яке називають уявною "в'язкістю  $|\mu_y|$ ", залежить від величини  $\xi$  /крива 3, рис.3/. Значення  $\mu_y$  зменшується з підвищенням  $\frac{dU}{dr}$  і крива течії поступово переходить в пряму зі сталим нахилом  $\mu_\infty$  /в'язкість при нескінченно великому зсуві/.

У логарифмічних координатах функція  $\frac{dU}{dr} = f(\xi)$  для псевдопластичних рідин приблизно виражається залежністю

$$\xi = k \left( \frac{dU}{dr} \right)^m, \quad /20/$$

де  $k$  і  $m$  - константи.

Величина  $k$  підвищується із збільшенням в'язкості і в міру консистенції рідини. Величина  $m$  менша за одиницю /між 0 і 1/, причому, чим менше  $m$ , тим значніше відрізняється течія псевдопластичної рідини від ньютонівської /для ньютонівської рідини  $m = 1$  і  $k = \mu_1$ ./

Характер зміни  $\mu_y$  для псевдопластичних рідин часто пов'язаний з орієнтацією їх часток /молекул/ у напрямі переміщення рідини.

Ділатантні рідини на відміну від псевдопластичних характеризуються підвищенням  $\mu_y$  із збільшенням  $\frac{dU}{dr}$  /крива 4 на рис.3/.

Для них теж застосовується залежність /20/, але показник степеня  $m > 1$ . Ділатантні рідини менше розповсюджені, ніж псевдопластичні, і являють собою суспензії з великою кількістю твердої фази.

До другої групи відносять неньютонівські рідини, у яких залежність  $\frac{dU}{dr}$  від  $\xi$  змінюється з часом. Для цих рідин уявна в'язкість  $\mu_y$  визначається не тільки градієнтом швидкості, але й тривалістю зсуву.

Відповідно до характеру впливу тривалості зсуву на структуру рідини до цієї групи відносять тіксотропні і реопектантні рідини.

Для тіксотропних рідин із збільшенням тривалості дії сталого напруження зсуву структура порушується і текучість підвищується. Проте після зняття напруження структура рідини поступово відновлюється

і вона перестав текти. Явище тіксотропії можна спостерігати на прикладі таких молочних продуктів, як кисле молоко, кефір, у яких в'язкість при бовтанні зменшується.

Реопектантні рідини відрізняються тим, що їх текучість із збільшенням тривалості дії напруження зсуву знижується.

До третьої групи відносять в'язкопружні, або максвелівські рідини, які течуть під дією напруження  $\tau$ , але після зняття напруження частково відновлюють свою форму, подібно до пружних твердих тіл. Такими властивостями характеризують деякі смоли і речовини тістоподібної консистенції.

Уявна в'язкість усіх неньютонівських рідин значно більша за в'язкість води.

## ЗМІСТ

Передмова.....	3
Розділ I. Фізико-механічні властивості рідин.....	4
Питома вага. Густина.....	4
Відносна питома вага і відносна густина.....	5
Температурне розширення.....	20
Стислість рідини.....	21
В'язкість.....	25
Течія ньютонівських рідин.....	38
Розділ II. Гідростатика.....	40
Гідромеханічний тиск.....	40
Сила тиску рідини на плоскі поверхні.....	42
Сила тиску рідини на криволінійні поверхні.....	42
Відносний спокій рідини.....	44
Розділ III. Гідродинаміка.....	46
Глава I. Основні положення.....	46
Умови застосування рівняння Д.Бернуллі.....	49
Критерії подібності.....	52
Втрати енергії на тертя при русі рідини в трубопроводі.....	57
Формули для обчислення коефіцієнта опору тертя.....	59
Місцеві гідравлічні опори.....	68
Залежність коефіцієнтів опору від типу рідини і числа $R$ .....	102

Глава 2. Гідравлічний розрахунок	
трубопроводів .....	104
Глава 3. Витікання рідини через отвори,	
насадки і водозливи.....	114
Витікання рідини через отвори.....	114
Витікання рідини через насадки.....	117
Витікання при змінному напорі.....	122
Витікання газів з отвору.....	124
Водозливи.....	127
Глава 4. Течія рідини у відкритих руслах і	
каналах.....	133
Гідравлічні елементи каналів різної	
форми.....	134
Глава 5. Гідравлічний удар.....	139
Глава 6. Взаємодія струменя	
з твердою перепорою.....	144
Розділ IV. Гідравлічні машини.....	149
Глава I. Лопатеві /відцентрові/ насоси.....	152
Характеристики відцентрових насосів.....	153
Робота насосів на трубопроводі.	
Робоча точка.....	153
Засоби регулювання подачі.....	155
Спільна робота насосів на трубопроводі.....	157
Закон пропорційності параметрів.....	158
Припустима висота всмоктування.	
Кавітація.....	159
Підбір насосів.....	161

Пуск і зупинка відцентрових насосів.....	164
Приклад розрахунку насосної установки з підбором насоса.....	167
Конструкції лопатевих насосів. Консольні насоси типу К і Км.....	170
Насоси двобічного входу типу Д.....	175
Фекальні насоси. Насоси типу СВГ.....	176
Багатоступеневі насоси.....	185
Осьові насоси.....	189
Вихрові насоси.....	197
Технологічні насоси типу КТС, Насос НКФ-150.....	199
Глава 2. Об'ємні насоси.....	200
Поршневі насоси.....	200
Подача насосів різної кратності.....	203
Ступінь нерівномірності подачі.....	203
Висота установки поршневого насоса.....	204
Повітряні ковпаки.....	205
Застосування поршневих насосів.....	208
Пуск, регулювання і зупинка поршневих насосів.....	211
Роторні насоси.....	211
Шестеренні насоси. Кулачкові насоси.....	212
Пластинчасті /шиберні/ насоси.....	215
Насоси типу РН. Гвинтовий насос.....	217
Водокільцеві насоси.....	219
Глава 3. Відцентрові вентилятори.....	221

Глава 4. Об'ємний гідропривод і його розрахунок.....	229
Розрахунок простого об'ємного гідропривода.....	230

Додатки.....	239
--------------	-----

Список літератури.....	273
------------------------	-----