

А. Е. КУЗЬМИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОСТИ И ПРЕДЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ СДВИГА КОРМОВЫХ ПАСТ

Вязкость η и предельное напряжение сдвига τ_0 являются одними из основных физико-механических свойств, определяющих поведение структурной жидкости при разных физических явлениях, в том числе кормовых смесей и паст при перекачивании их по трубам (1). Величины η и τ_0 входят в известную формулу, определяющую потери напора (сопротивления) структурных жидкостей при движении их по трубам (3).

$$i = \frac{32\eta V_{\text{ср}}}{\gamma d^2} + \frac{16\tau_0}{3\gamma d} \quad (1)$$

Для изучения вязко-пластичных свойств дисперсных систем типа высококонцентрированных суспензий и паст при комнатных температурах применяются ротационные вискозиметры типа РВ-4. Прибор позволяет производить измерения пластической вязкости в пределах $1-10^5$ пуаз и предельного напряжения сдвига $50-10^5$ дин/см².

В связи с дефицитностью вискозиметра РВ-4 по его параметрам (2, 4) нами изготовлен прибор, с помощью которого проведены исследования кормовых паст с различным содержанием компонентов и влажности.

Устройство прибора и подготовка его к работе

Общий вид изготовленного прибора представлен на рис. 1. Неподвижный цилиндр 1 расположен внутри полого цилиндра 2. Пространство между цилиндрами заполняется

исследуемым кормом. Цилиндр 2 приводится во вращение грузами, прикрепленными к концам нитей, которые перекинуты через блоки 3 и намотаны на барабан 4. Внутренний цилиндр 1 имеет рифленую поверхность, что исключает возможность скольжения исследуемой смеси по поверхности цилиндра. Запускают прибор и его останавливают с помощью тормозного приспособления. Прибор устанавливается на высоте 1,25—1,5 м от пола, чтобы барабан успел сделать достаточное число оборотов прежде, чем грузы, прикрепленные к концам нити, коснутся пола.

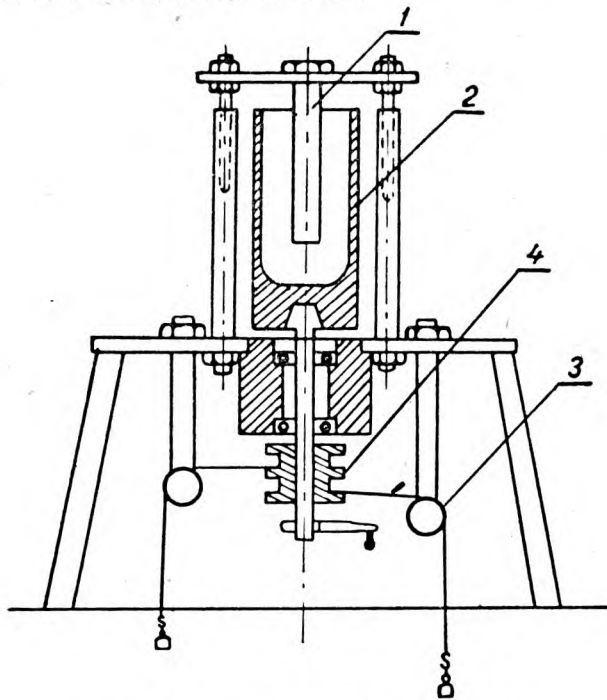


Рис. 1. Схема ротационного вискозиметра.

Перед проведением опытов определяют потери на трение в приборе. Для этого строят график зависимости между числом оборотов пустого внешнего цилиндра вискозиметра и весом грузов. Чтобы построить график, помещают на концы нитей небольшие грузы и находят угловую скорость вращения наружного цилиндра для нескольких значений суммар-

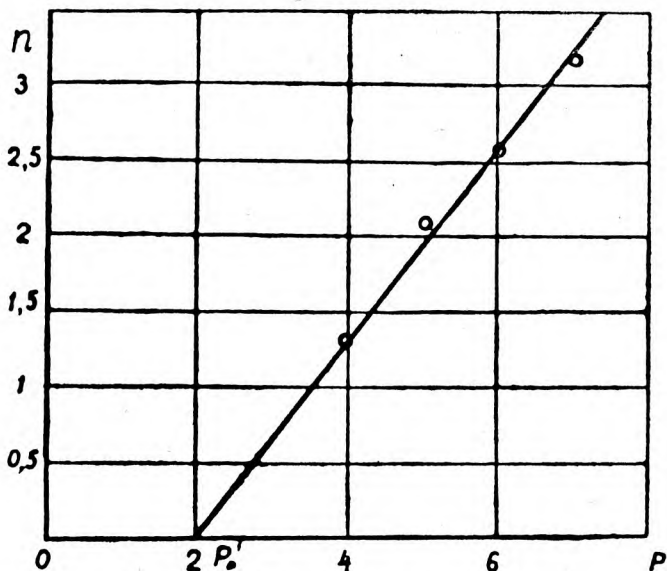


Рис. 2. График трения подшипников.

ного веса грузов. При построении графика по оси абсцисс откладывают вес грузов в граммах, а по оси ординат — угловую скорость, выражая ее через число оборотов n в секунду. График трения подшипников приведен на рис. 2. Расстояние между осью ординат и прямой показывает потери на трение в приборе при соответствующих оборотах. Эта величина используется в дальнейшем при обработке результатов измерений.

Подсчет предельного напряжения и коэффициента пластической вязкости кормовых паст

Пользуясь результатами теории, разработанной для ротационного вискозиметра, можно получить формулы, позволяющие рассчитывать величины предельного напряжения τ_0 и коэффициента пластической вязкости $\eta_{пл}$ для вязкопластичных материалов, к числу которых относятся кормовые пасты (2).

Известно, что если пространство между наружным и внутренним цилиндрами прибора заполнено вязкопластичной средой, то при малых грузах, хотя и превышающих силу

трения подшипников, вращения внешнего цилиндра не наблюдается. Движение системы будет происходить только после того, как величина действующей силы F_0 станет достаточной для преодоления предельного напряжения сдвига на некоторой поверхности S_0 , которая в данном случае равна поверхности внутреннего цилиндра. При этом для случая предельного равновесия $F_0 = S_0\tau_0$.

Для определения τ_0 необходимо знать константу прибора и найти экспериментально величину груза P_0 , соответствующего началу вращения цилиндра. Тогда τ_0 можно определить по следующей формуле:

$$\tau_0 = K_0 P_0 \text{ дин/см}^2, \quad (2)$$

$$K_0 = \frac{Rg}{2\pi r_1^2 h}, \quad (3)$$

где R — радиус барабана и r_1 — радиус внутреннего цилиндра в см, h — глубина погружения внутреннего цилиндра в исследуемую среду в см, $g = 981 \text{ см/сек}^2$ — ускорение силы тяжести, P_0 — вес груза в граммах, при котором начинается вращение системы.

При определении коэффициента вязкости дисперсной системы могут встретиться два случая и соответственно имеются две различные формулы для его вычисления.

Если величина груза P , приводящего систему во вращение с некоторой угловой скоростью, не очень велика, то сдвиг испытывает не вся масса в пространстве между цилиндрами, а только ряд слоев, прилегающих к внутреннему цилиндру. Остальные слои вращаются как одно целое со скоростью, равной скорости вращения внешнего цилиндра. В этом случае говорят, что сдвиг не распространяется до конца, и вычисление коэффициента вязкости производят по следующей формуле:

$$\eta_{\text{пл}} = \frac{\tau_0}{4\pi n} \left(\frac{P}{P_0} - 1 - \ln \frac{P}{P_0} \right) \text{ пз}, \quad (4)$$

где n — число оборотов наружного цилиндра в секунду,

P_0 — минимальный груз, приводящий систему в движение (в граммах).

При постоянном увеличении числа оборотов цилиндра сдвиг распространяется на все большее число слоев исследуемого вещества, и, наконец, сдвиг будет наблюдаться во всем пространстве между цилиндрами. Это значит, что слой, прилегающий к неподвижному цилиндру, остается все время

в покое, а скорости всех остальных слоев по мере приближения к внешнему цилиндру увеличиваются. Максимальную скорость имеет слой, прилегающий к вращающемуся цилиндру. В этом случае для подсчета коэффициента вязкости $\eta_{пл}$ необходимо применять следующую формулу:

$$\eta_{пл} = \frac{1}{n} (K_1 P - K_2 \tau_0), \quad (5)$$

$$K_1 = \frac{gR(r_2^2 - r_1^2)}{8\pi^2 r_1^2 r_2^2 h}, \quad (6)$$

$$K_2 = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi}, \quad (7)$$

r_2 — радиус внешнего цилиндра (в сантиметрах).

Для решения вопроса о том, какой из приведенных формул следует пользоваться в каждом отдельном случае, необходимо всякий раз предварительно вычислить то минимальное значение веса груза P_1 , при котором сдвиг может распространяться до конца. Это легко сделать, воспользовавшись формулой

$$P_1 = k_3 \tau_0, \quad (8)$$

где
$$K_3 = \frac{2\pi r_2^2 h}{R} \quad (9)$$

После того, как найдено P_1 , становится ясным, какой из двух указанных выше случаев имеет место и какое уравнение — (4) или (5) — надо использовать для расчета $\eta_{пл}$.

Для упрощения расчетов $\eta_{пл}$ обычно пользуются специальными расчетными таблицами, несколько преобразовав формулу (4). В этом случае расчетная формула приобретает следующий вид:

$$\eta_{пл} = \frac{\tau_0}{n} F\left(\frac{P}{P_0}\right), \quad (10)$$

где
$$F\left(\frac{P}{P_0}\right) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{P}{P_0} - 1 - \ln \frac{P}{P_0} \right). \quad (11)$$

Значение $F\left(\frac{P}{P_0}\right)$ приведены для различных величин $\frac{P}{P_0}$ в табл. 1.

Для вычисления $\eta_{пл}$ в том случае, когда сдвиг слоев исследуемого корма не распространяется до конца, необходимо выбрать на кривой $n = f(P)$ (кривая 3 на рис. 3) несколько разных точек, найти для каждой из них значение отношения

Таблица 1

$\frac{P}{P_0}$	$F\left(\frac{P}{P_0}\right)$	$\frac{P}{P_0}$	$F\left(\frac{P}{P_0}\right)$	$\frac{P}{P_0}$	$F\left(\frac{P}{P_0}\right)$	$\frac{P}{P_0}$	$F\left(\frac{P}{P_0}\right)$
1,1	0,00090	2,3	0,03716	3,5	0,09923	5,8	0,24305
1,2	0,00140	2,4	0,04174	3,6	0,10494	6,0	0,25527
1,3	0,00299	2,5	0,04644	3,7	0,11072	6,3	0,27644
1,4	0,00505	2,6	0,05139	3,8	0,11656	7,0	0,32258
1,5	0,00752	2,7	0,05623	3,9	0,12245	7,5	0,35710
1,6	0,01034	2,8	0,06131	4,0	0,12839	8,0	0,39153
1,7	0,01348	2,9	0,06645	4,3	0,14661	9,0	0,46174
1,8	0,01688	3,0	0,07173	4,6	0,16501	10,0	0,53292
1,9	0,02054	3,1	0,07706	4,8	0,18082	11,0	0,60524
2,0	0,02441	3,2	0,08249	5,0	0,19021	12,0	0,67757
2,1	0,02849	3,3	0,08801	5,2	0,20306	13,0	0,83254
2,2	0,03275	3,4	0,09358	5,4	0,21592	14,0	0,90502
						15,0	0,97750

$\frac{P}{P_0}$ по табл. 1 определить соответствующее значение функции $F\left(\frac{P}{P_0}\right)$. Затем по кривой $n = f(P)$ находят число оборотов цилиндра n для тех же значений грузов p , для которых вычислены отношения $\frac{P}{P_0}$, и определяют по формуле (10) значение $\eta_{пл}$. По найденным таким образом отдельным значениям $\eta_{пл}$ подсчитывают среднюю величину коэффициента пластической вязкости для исследуемого образца кормовой пасты.

Результаты исследований и подсчета τ_0 , $\eta_{пл}$

Вискозиметр, на котором проводились исследования τ_0 и $\eta_{пл}$ имеет: радиус барабана $R = 2,2$ см, радиус внутреннего цилиндра $r_2 = 0,5$ см, радиус внешнего цилиндра $r_1 = 2$ см и глубину погружения внутреннего цилиндра $h = 4$ см. Зна-

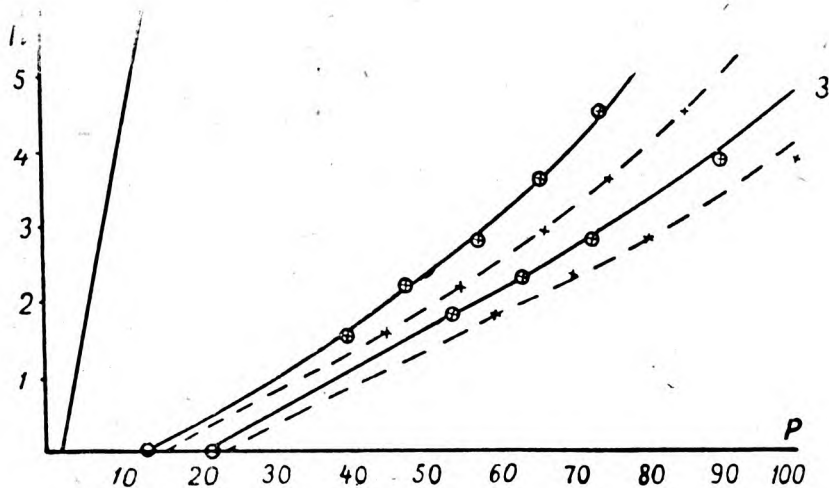


Рис. 3. График функции $n = f(P)$.

чения констант, подсчитываемых по формулам (3) и (9), оказываются равными: $K_0 = 275 \text{ л/см} \cdot \text{сек}^2$ и $K_3 = 0,06 \text{ см/сек}^2$.

В табл. 2 приведены 10 разных рационов для кормления свиней, которые были подвергнуты исследованиям на τ_0 и $\eta_{\text{пл}}$.

Рационы приняты по литературным источникам (7) и охватывают суточную потребность в кормах для различного вида свиноголовья как по виду, так и по типам кормления. Номера рационов введены нами для пользования ими только в пределах статьи.

Кормовые смеси в первоначальном виде представляют собой полусухую массу, которая к подаче по трубам насосами непригодна. Поэтому состав каждого рациона по этапам разбавляется водой, с соответствующим определением влажности, объемного веса, τ_0 и $\eta_{\text{пл}}$.

На рис. 4 показаны зависимости между скоростью вращения наружного цилиндра вискозиметра и весами грузов для рациона 9. Из графика следует, что с уменьшением влажности кривые зависимости $n = f(P)$ сдвигаются вправо. Вид этих кривых характерен для вязко-пластичных тел и свидетельствует о различных фазах течения кормов в пространстве между внутренним и наружным цилиндрами. Подобный характер кривых был получен также при исследовании осадков сточных вод (5) и суспензий руды (7). Рассмотрим кривые,

Таблица 2

Номер рациона	Концент- рированные корма, кг	Процент- ное содер- жанье	Корнело- ды, кг	Процент- ное содер- жанье	Комбини- рованный сигос исоч- ные, кг	Процент- ное содер- жанье	Сенная мука, кг	Процент- ное содер- жанье	Обрат, кг	Процент- ное содер- жанье	Трикальций- фосфат, г	Процент- ное содер- жанье	Соль по- варенная, г	Процент- ное содер- жанье
1	0,5	15,0	4,5	44,2	4,0	40,1	—	—	—	—	30	0,3	40	0,4
5	3,5	25,0	7,0	50,0	2,0	14,3	1,5	10,7	—	—	—	—	—	—
6	3,5	27,0	4,0	31,0	4,0	31,0	0,3	3,0	1,0	8,0	—	—	—	—
7	4,9	37,0	—	—	7,5	56,5	0,4	3,0	0,3	2,5	85	0,7	30	0,3
8	1,0	32,2	—	—	0,9	29,0	0,1	3,3	1,1	35,5	5	0,02	10	0,034
9	2,0	25,1	—	—	5,5	69,0	0,4	5,4	—	—	23	0,2	32	0,3
10	0,85	22,0	1,6	40,0	0,3	7,9	0,2	5,0	1,0	25	20	0,06	15	0,04
13	1,0	31,0	0,5	15,5	1,5	46,5	0,2	6,0	—	—	20	0,6	15	0,4
14	1,5	24,5	1,0	16,6	3,2	53,0	0,3	5,0	—	—	30	0,5	25	0,4
17	1,8	38,5	1,0	21,4	1,0	21,4	0,3	7,0	0,5	10,5	30	0,64	25	0,56

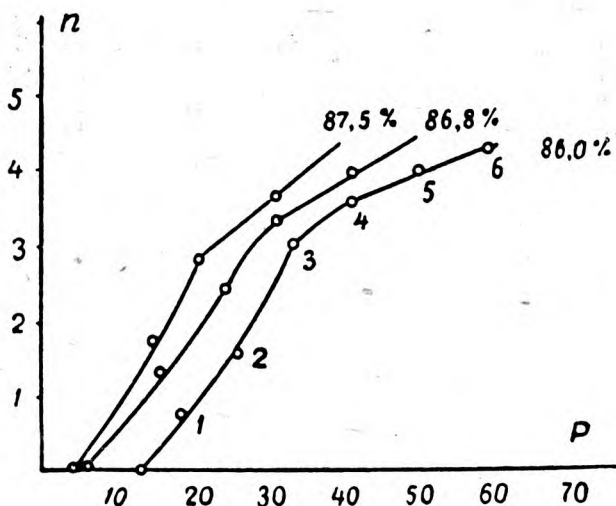


Рис. 4. График функции $n = f(P)$.

построенные нами по данным опытов (рис. 4.) Явления, при котором сдвиг распространяется на всю массу до конца, в наших опытах не наблюдалось. Это видно, прежде всего, из подсчетов P_1 , по формуле (8). По подсчетам величина $P_1 = 498$ г. Такой груз при наших опытах не применялся и значит явления распространения сдвига до конца, как утверждает С. В. Яковлев (5), для осадков сточных вод, в наших условиях нет, хотя характер кривых идентичен характеру кривых для сточных вод. Из рис. 4 следует, что кривая до точки 1 соответствует разгону прибора с нераспространившимся до конца сдвигом от точки 1 до точки 3 — установившийся режим, от точки 3 и далее турбулентный режим течения массы с нераспространившимся до конца сдвигом. Рассматривая кривые, построенные для этого же рациона, но с возрастающими влажностями, видим, что начало турбулентного течения наступает тем раньше, чем больше влажность.

Результаты исследования $\eta_{пл}$, τ_0 влажности ω в процентах, объемного веса γ г/см³, H — отношение веса залитой воды к первоначальному весу кормовой пасты приведены в табл. 3.

В качестве примера подсчета τ_0 , $\eta_{пл}$ рассмотрим результаты одного из опытов с картофелем, пропущенным через

Таблица 3

Номер рациона	γ г/см ³	ω %	H	$\eta_{пл}$ пз	τ_0 дин/см ²
1	1,0005	89,67	1,55	35,5	1,1 · 10 ³
5	0,940	80,0	1,29	44,6	1,92 · 10 ³
	0,990	84,8	1,68	52,2	0,725 · 10 ³
	1,010	86,0	1,94	56,4	0,69 · 10 ³
6	0,990	86,4	1,55	35,7	1,24 · 10 ³
	1,000	86,8	1,8	42,5	0,96 · 10 ³
	1,000	87,71	2,06	36,0	0,825 · 10 ³
7	1,000	88,13	1,55	45,0	1,65 · 10 ³
	1,000	89,05	1,8	61,0	1,37 · 10 ³
	1,000	89,4	2,06	40,4	1,92 · 10 ³
8	0,90	87,65	0,7	49,0	1,65 · 10 ³
	0,98	88,1	0,82	66,0	1,37 · 10 ³
	1,000	88,7	0,955	59,8	1,24 · 10 ³
9	0,990	86,15	1,43	54,7	3,58 · 10 ³
	1,000	86,76	1,68	80,9	1,65 · 10 ³
	1,000	86,9	1,94	67,2	1,37 · 10 ³
	1,010	87,5	2,2	61,4	1,37 · 10 ³
17	—	81,5	0,78	55,8	2,75 · 10 ³
	0,980	82,5	0,916	48,0	1,92 · 10 ³
	0,980	83,2	1,02	43,0	1,65 · 10 ³
	0,990	84,1	1,15	43,0	1,65 · 10 ³
	0,990	85,5	1,29	69,5	1,37 · 10 ³

Продолжение таблицы 3

Номер рациона	γ г/см ³	$\omega\%$	H	$\eta_{пл}$ пз	τ_0 дин/см ²
10	0,72	71	0,25	33,8	7,7. 10 ³
	"	74	0,58	15,4	6,6. 10 ³
	0,942	77,1	0,64	37,4	3,85. 10 ³
	0,942	77,1	0,64	39,2	2,75. 10 ³
	1,004	80,6	0,97	63,8	2,2. 10 ³
	1,005	83,35	1,09	69,2	1,92. 10 ³
13	—	79,4	1,29	63,0	1,37. 10 ³
	0,985	79,5	1,43	71,0	1,24. 10 ³
	0,985	79,5	1,43	28,9	1,92. 10 ³
	0,990	85,2	1,68	45,6	1,65. 10 ³
	0,995	85,3	1,94	58,8	1,37. 10 ³
	1,0001	86,66	2,22	61,3	1,24. 10 ³
14	—	82,0	0,78	51,8	4,68. 10 ³
	1,000	85,47	1,29	23,4	3,02. 10 ³
	1,000	85,47	1,29	37,1	2,2. 10 ³
	1,000	86,3	1,42	17,2	1,93. 10 ³
	1,005	86,6	1,54	42,5	1,65. 10 ³
	Картофель	1,095	73,78	—	196
Кукуруза (силос)	0,270	76	—	175	3,58. 10 ³

P	Π	$\frac{P}{P_0}$	$F\left(\frac{P}{P_0}\right)$	$\frac{\tau_0}{\Pi} \cdot 10^{-3}$
57	2,0	2,58	0,05040	3,25
66	2,5	3,0	0,07173	2,6
75	3,0	3,4	0,09358	2,16
83	3,5	3,77	0,11482	1,85
90	4,0	4,1	0,13446	1,63
				$\eta_{\text{плл}}$

Таблица 4

$\eta_{плл} ПЗ$	ϵ	ϵ^2	Примечание
163,0	+33	1089	$\tau_0 = 6,5 \cdot 10^3$ дин/см ²
186,0	+10	100	$\eta_{плл} = 196 \pm 9,2\%$ пз
205,0	-9	81	$\eta = \pm 18$ пз
212,0	-16	256	$\Sigma \epsilon^2 = 2010$
218,0	-22	484	
$= 196 \pm 9,2\%$	$\Sigma \epsilon^2 = 2010$		

пастоизготовитель и имевшем влажность 75%. Максимальное значение веса груза, приводящего систему в движение, с учетом поправок на трение было равно $P_0 = 22$ г. Предельное напряжение сдвига, полученное для данного корма по формуле (2), составляет $\tau_0 = 6,5 \cdot 10^3$ дин/см². Величина веса P_1 , при которой сдвиг в пространстве между цилиндрами распространяется до конца, получается по формуле (8) равной $P_1 = 498$ г.

Примененные в опытах веса грузов были меньше значений P_1 , поэтому расчеты коэффициента пластической вязкости велись по формуле (4) и для упрощения расчетов по формуле (10). Результаты опыта и вычисление значений $\eta_{пл}$ приведены в табл. 4. Значения P_0 , P , n определены экспериментом, а значения $F \left(\frac{P}{P_0} \right)$ взяты из табл. 1.

Ошибка отдельного измерения $\eta = \pm 0,8 \sqrt{\frac{\sum \varepsilon^2}{n-1}}$; обычно

точность измерения τ_0 и $\eta_{пл}$ должна находиться в пределах 5—10% (2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Петренко Ф. Ф. Движение гидромассы по трубам и расчет массопроводов гидроторфа. Труды ВНИИ механизации торфяной промышленности. Вып. 1, 1938.
2. Воларович М. П., Бранопольская Р. А. Исследование физико-механических свойств пшеничного теста, 1940.
3. Ивянский Г. Б. Транспорт строительных растворов по трубам, 1957.
4. Новые физические методы исследования торфа, под ред. М. П. Воларович, 1960.
5. Яковлев С. В., Ласков Ю. М. Перекачка ила и осадков сточных вод, 1961.
6. Спиваковский А. О. и др. Гидравлический и пневматический транспорт на горных предприятиях, 1962.
7. Лаврушин Л. Подача текучих кормовых смесей насосом. Ж. «Техника в сельском хозяйстве», № 5, 1965.
8. Кормовые рационы и нормы кормления для сельскохозяйственных животных, под ред. М. Ф. Томмэ, 1963.