

УДК 621.86.04

Поступила в редакцию 09.01.2025
Received 09.01.2025**З. В. Ловкис***РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию», г. Минск, Республика Беларусь*

К РАСЧЕТУ ЗАКРЫТОГО ГИДРОТРАНСПОРТА ПОЛУФАБРИКАТОВ И ПРОДУКТОВ

Аннотация. Приведены новые научные данные по транспортировке полуфабрикатов и продуктов по закрытым трубопроводам при насыщении смеси пузырьками растворенного и нерастворенного воздуха. Предложено при расчетах потерь по длине трубопровода применять дополнительный коэффициент неоднородности смеси.

Приведенные коэффициенты трения и методика расчета и обоснования параметров могут быть использованы при проектных расчетах гидротранспортных установок.

Ключевые слова: гидротранспорт, коэффициенты, смеси, характеристики, расчет, жидкость, кислород.

Z. V. Lovkis*RUE “Scientific and Practical Center for Foodstuffs of the National Academy of Sciences of Belarus”,
Minsk, Republic of Belarus*

TO THE CALCULATION OF CLOSED HYDROTRANSPORT OF SEMI-FINISHED PRODUCTS AND PRODUCTS

Abstract. New scientific data are presented for the transportation of semi-finished products and products through closed pipelines when the mixture is saturated with bubbles of dissolved and undissolved air. It is proposed to use an additional coefficient of mixture heterogeneity when calculating losses along the length of the pipeline.

The given friction coefficients and the calculation and justification methods for the parameters can be used in design calculations of hydrotransport installations.

Keywords: hydrotransport, coefficients, mixtures, characteristics, calculation, liquid, oxygen.

Введение. Гидравлический трубопроводный транспорт нашел широкое применение в технологических процессах при передаче продукта на различные расстояния. По закрытым трубопроводам могут перемещаться вода, топливо и смазочные материалы, строительные материалы (песок, смеси), овощи, плоды и ягоды, газовые продукты и др.

Гидравлический трубопроводный транспорт обладает высокой производительностью, возможностью совмещения транспортирования с другими технологическими операциями, относительно низкой удельной металлоемкостью оборудования и доступностью в обслуживании, возможностью автоматизации и высокими экономическими показателями.

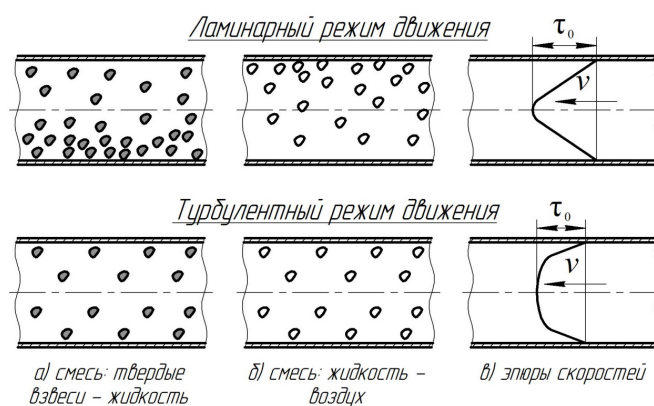
Результаты исследований и их обсуждение. При проектировании систем закрытого гидротранспорта необходимо знать характеристики транспортируемого продукта: параметры, плотность, твердость, вязкость, коэффициент трения о поверхность (табл. 1)

По закрытым трубопроводам перемещаются как жидкости с разной плотностью (вода, молоко, топливо), так и с твердыми, нерастворенными включениями (корм, фрукты, овощи, песок, канализационные отходы) и газовыми (кислород, озон, воздух).

При ламинарном режиме движения твердые частицы смеси стремятся осесть в нижней части трубопровода, что приводит к образованию отложений, уменьшению проходного сечения и требует регулирования (увеличения) скорости потока. При перемещении жидкости, в которой находятся пузырьки нерастворенного воздуха наблюдается обратное явление — пузырьки воздуха стремятся подняться в верхнюю часть трубопровода. При турбулентном скоростном режиме движения в трубопроводе образуются равномерные по всему контуру смеси как твердых, так и воздушных составляющих

Таблица 1. Характеристики отдельных видов транспортируемого продукта
Table 1. Characteristics of individual types of transported product

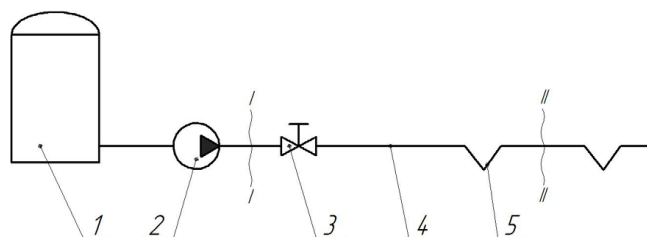
Транспортируемый продукт	Параметры (эквивалентный диаметр), мм	Плотность, ρ , кг/м ³	Твердость поверхности, Н, мПа	Коэффициент трения (скольжения) по поверхности, μ		Коэффициент динамической вязкости μ , мПа*с
				Сталь	Пластик	
Вода		1000	-	0,08...0,1	0,1...0,12	1,0...1,8
Пиво		1016-1067	-	0,1...0,15	0,15...0,17	1,45...2,4
Спирт		790	-	0,08...0,1	0,12...0,15	1,5...2,9
Молоко		1026	-	0,12...0,16	0,18...0,2	1,4...2,5
Масло рапсовое		970	-	0,1...0,15	0,2...0,24	47...98
Соки, напитки с включением	0,005...0,01	1010 — 1054	-	0,12 - 0,16	0,1 — 0,15	1,7...1,9
Пюре для детского питания	0,01...0,1	1040 — 1300	-	0,3 — 0,4	0,28 - 0,35	250...400
Горошек, клюква, голубика	5-15	980 — 1100	0,8...1,1	0,42 - 0,45	0,4 — 0,5	-



τ_0 — касательные напряжения трения по поверхности трубопровода, Н/м²; v — средняя скорость потока, м/с

Рис. 1. Общий вид перемещаемой смеси по закрытому трубопроводу
Fig. 1. General view of the mixture being moved through a closed pipeline

Для выбора, расчета и конструирования закрытого гидротранспорта жидкотекучих смесей различной консистенции решающее значение имеют расход смеси и гидравлические потери, которые определяют необходимые напор, КПД, мощность, надежность работы от установленных значений расхода и дальности транспортирования (рис.2)



1 — емкость-смеситель; 2 — насос; 3 — кран-здвижка; 4 — трубопровод; 5 — потребитель

Рис. 2. Схема к расчету гидравлических транспортных систем
Fig. 2. Scheme for calculating hydraulic transport systems

Характер движения рабочей смеси по закрытому трубопроводу зависит от значения критерия Рейнольдса (R_e), который определяется по формуле [1].

$$R_e = \frac{v_{cp} \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{1.27 Q}{dv} \quad [1]$$

где v_{cp} — средняя скорость движения смеси на данном участке, м/с; Q — секундный расход смеси,

$$Q = S v_{cp}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где S — площадь поперечного сечения потока, м^2 , ($S = \frac{\pi d^2}{4}$); d — внутренний диаметр трубопровода,

м; μ — коэффициент динамической вязкости, МПа·с; ρ — плотность смеси, $\text{кг}/\text{м}^3$; ν — коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; $R_{e\text{кр}} = 2000 \dots 2300$ для ламинарного режима течения смеси.

Коэффициенты кинематической (ν) и динамической (μ) вязкости связаны отношением $\nu = \mu / \rho$, где μ (Па·с), ν ($\text{м}^2/\text{с}$), а плотность ρ ($\text{кг}/\text{м}^3$). Коэффициенты вязкости зависят от состава смеси, температуры, давления и др. параметров.

Для ламинарного режима движения смеси расчетный внутренний диаметр трубопровода определяется зависимостью

$$1,13 \cdot \sqrt{\frac{Q}{v_{cp}}} \geq d \geq \frac{R_e \nu}{v_{cp}} \quad [2].$$

Согласно ГОСТ, трубопроводы для транспортировки пищевой продукции бывают диаметром 12, 18, 22, 28, 34, 40, 52, 70, 85, 104, 129, 154 и 204 мм. Рекомендуемая средняя скорость $v_{cp} = 0,5 \dots 1,4$ м/с.

Секундный объем смеси, перемещаемой гидравлически в закрытом трубопроводе, наполненном водой, можно определить по формуле [4]:

$$Q = (W + q) / \rho,$$

где W — секундный расход воды, $\text{кг}/\text{с}$; q — секундный расход продукта, $\text{кг}/\text{с}$; ρ — удельная плотность гидросмеси, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Формулу можно преобразовать

$$Q = \frac{q \left(\frac{W}{q} + 1 \right)}{\rho}; \quad [3];$$

$$\rho = \frac{\rho_T + \rho_{\text{ж}} + \rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{ж}}}, \quad [4].$$

где ρ_T — плотность продукта, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{\text{в}}$ — плотность воздуха — $1,3 \text{ кг}/\text{м}^3$ (кислорода $\rho_{\text{к}} = 1,43 \text{ кг}/\text{м}^3$; озона $\rho_{\text{о}} = 2,14 \text{ кг}/\text{м}^3$).

В заполненном рабочей смесью (сухой продукт плюс вода) трубопроводе всегда присутствует газоздушная составляющая, которая может быть как в растворенном состоянии (фаза Р), так и в нерастворенном, в виде пузырьков (фаза Г). При работе гидротранспорта фазы «Г» и «Р» постоянно переходят одна в другую, а в неподвижном состоянии может происходить подъем и местная концентрация достаточно крупных пузырьков ($d > 10$ мкм) фазы «Г», их всплытие и переход в фазу «Р» в соответствии с законом Генри [5]. Количественное содержание пузырьков определяется их свойствами (в первую очередь силами поверхностного натяжения), конкретными условиями образования пузырьков, давлением, местными сопротивлениями и скоростями движения.

При работающей системе содержание в жидком продукте фаз «Р» и «Г» нестабильно и оценивается отклонениями $\alpha_p = V_p / V_c$ и $\alpha_r = V_r / V_c$ при давлении 760 мм. рт. ст. и температуре 273°К, где V_c — объем смеси, V_p — объем растворенной части воздуха, V_r — объем нерастворенной части воздуха. По данным исследований [1,5] коэффициент (α_p) растворенного воздуха может достигать значений 7...11%, а α_r по факту насыщения.

От содержания фаз «Р» и «Г» зависит вязкость (ν) и плотность (ρ) перемещаемой смеси (ρ), а также сила поверхностного натяжения (σ).

Деформация пузырьков воздуха «Г» сопровождается ростом температуры, а рост давления приводит к росту температуры и переходу пузырьков воздуха с фазы «Г» в фазу «Р».

Для расчета потерь напора применением уравнения Бернулли для участка I-II (рис.1). При установившемся движении смеси изменение величины суммы трех напоров: скоростного $\frac{v^2}{2g}$ (при ламинарном движении $\frac{\alpha v^2}{2g}$), давления $\frac{p}{\gamma}$ и высотного Z между двумя сечениями потока – равно потери напора между сечениями

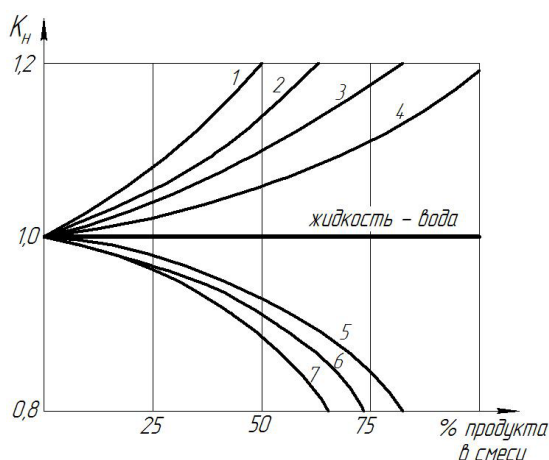
$$\left(\frac{\alpha v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + Z_1 \right) - \left(\frac{\alpha v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + Z_2 \right) = \Sigma \lambda \frac{lv^2}{d2g} + \Sigma b \xi \frac{v^2}{2g}, \quad [5].$$

где $v_{1,2}$ – средняя скорость потока, м/с; α – коэффициент скорости ($\alpha=1-2$); g – ускорение силы тяжести, $9,81 \text{ м/с}^2$; P – абсолютное давление, Па; γ – удельный вес смеси, Н/м^3 ; Z – уровень жидкости относительно принятого нулевого уровня, м; λ – коэффициент трения в трубопроводе; d – внутренний диаметр трубопровода, м; ξ – коэффициент местных потерь в коленах, кранах, при расширении (потреблении); b – поправочный коэффициент.

Значение коэффициента λ для однородной жидкости при ламинарном режиме движения, при изотермическом потоке можно определить по формуле $\lambda = \frac{64}{Re}$.

По более точным данным расчет величины коэффициента λ нужно вести с учетом относительной шероховатости стенок трубопровода $\frac{\Delta}{d_s}$, где Δ – абсолютная шероховатость, d_s – внутренний диаметр трубопровода, мм. Абсолютная шероховатость для пластмассового трубопровода $\Delta = 0,03 \text{ мм}$, стального – $\Delta = 0,04 \text{ мм}$.

Для неоднородной смеси при определении трения по длине трубопровода автором предлагается ввести дополнительный коэффициент (K_n) неоднородности смеси, рис.3.



1 — клюква; 2 — горошек; 3 — пюре яблочное; 4 — сок, напитки; 5 — озон; 6 — кислород; 7 — воздух

Рис. 3. К определению дополнительного коэффициента трения (K_n) для неоднородной смеси
Fig. 3. To determine the additional coefficient of friction (K_n) for a heterogeneous mixture

Для расчета коэффициентов местных потерь пользуются опытными данными. При ламинарном потоке, где доля потерь на трение значительная, величину коэффициента местных потерь ζ рекомендуют рассматривать с поправочным коэффициентом «в», который с уменьшением Re растет и для ламинарного режима движения в нашем случае $b = 1,2...2,0$ [6].

Тогда для участка I — II потери напора составят

$$\Delta P = K_n \lambda \frac{lv^2}{d2g} + b(\zeta_1 + \zeta_2) \frac{v^2}{2g},$$

где ζ_1 – коэффициент местных потерь крана; ζ_2 – коэффициент местных потерь насадки потребителя [1].

Давление нагнетания с которым должен работать насос составит:

$$P = (\Delta_k - \Delta_n) \rho g + \Delta P,$$

где Δ_k и Δ_n — геодезические отметки конца и начала подъема гидросмеси, м².

Для обеспечения работы закрытого гидротранспорта по сводному графику полей производительности и давления (Q-P) выбираем необходимый насос.

Заключение. Приведена методика расчета гидротранспорта закрытого типа, научно обосновано применение дополнительного коэффициента (κ_n) для неоднородных смесей при расчетах потерь по длине трубопроводов.

Список использованных источников

1. Ловкис, З. В. Гидравлика: учеб. пособие / З. В. Ловкис. — Минск : Беларус. навука, 2012. — С. 439.
2. Ловкис З. В. Экспериментальное определение параметров системы гидротранспорта плодовоовощного сырья / З. В. Ловкис. — Доклады НАН Беларуси. — 2023. — Т. 67, №1. — С. 83–88.
3. Ловкис, З. В. Детское питание: наука, технологии, продукты: [монография] / З. В. Ловкис. — Минск: ИВЦ Минфина, 2023. — С. 355.
4. Ловкис, З. В. Гидравлика : учебное пособие / З. В. Ловкис, Б. А. Карташов, П. В. Лаврухин. — Ростов н/Д : Феникс, 2019. — С. 383.
5. Гиршфельдер, Дж. Молекулярная теория газов и жидкостей: пер. с англ. / Дж. Гиршфельдер, Ч. Кертисс, Р. Берд; Под ред. Е. В. Ступоченко. — Москва : Изд-во иностр. лит., 1961. — С. 929.
6. Хаймович Е. М. Гидроприводы и гидроавтоматика станков / Е. М. Хаймович. — Москва: Южное отделение машгиза, 1959. — С. 551.

Информация об авторах

Ловкис Зенон Валентинович, академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Республики Беларусь, главный научный сотрудник РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию» (ул. Козлова, 29, 220037, Минск, Республика Беларусь).

Information about the authors

Lovkis Zenon Valentinovich, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Republic of Belarus, Chief Researcher of RUE RUE “Scientific and Practical Center for Foodstuffs of the National Academy of Sciences of Belarus” (29, Kozlova str., 220037, Minsk, Republic of Belarus).