

Некоторые физические свойства жидкостей

Масса единицы объёма жидкости называется **плотностью** и обозначается через ρ :

$$\rho = \frac{m}{V} = \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]$$

где m – масса жидкости, кг; V – объём жидкости, м³.

Плотность смеси капельных жидкостей, при смешении которых не происходит существенных физико-химических изменений, приближённо можно рассчитать, принимая, что объём смеси равен сумме объёмов компонентов:

$$\frac{1}{\rho_{\text{см}}} = \frac{\omega_1}{\rho_1} + \frac{\omega_2}{\rho_2} + \dots$$

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1}{\frac{\omega_1}{\rho_1} + \frac{\omega_2}{\rho_2} + \dots}$$

где $\omega_1, \omega_2, \dots$ – массовые доли компонентов смеси; $\rho_{\text{см}}, \rho_1, \rho_2, \dots$ – плотности смеси и её компонентов, кг/м³.

Расчёт плотности нефти в зависимости от температуры

Плотность нефти определяют лабораторными анализами. Обычно её измеряют при 20°C (293 К). Для определения плотностей нефтей при других температурах T (в К) пользуются линейным законом Д.И. Менделеева в виде формул:

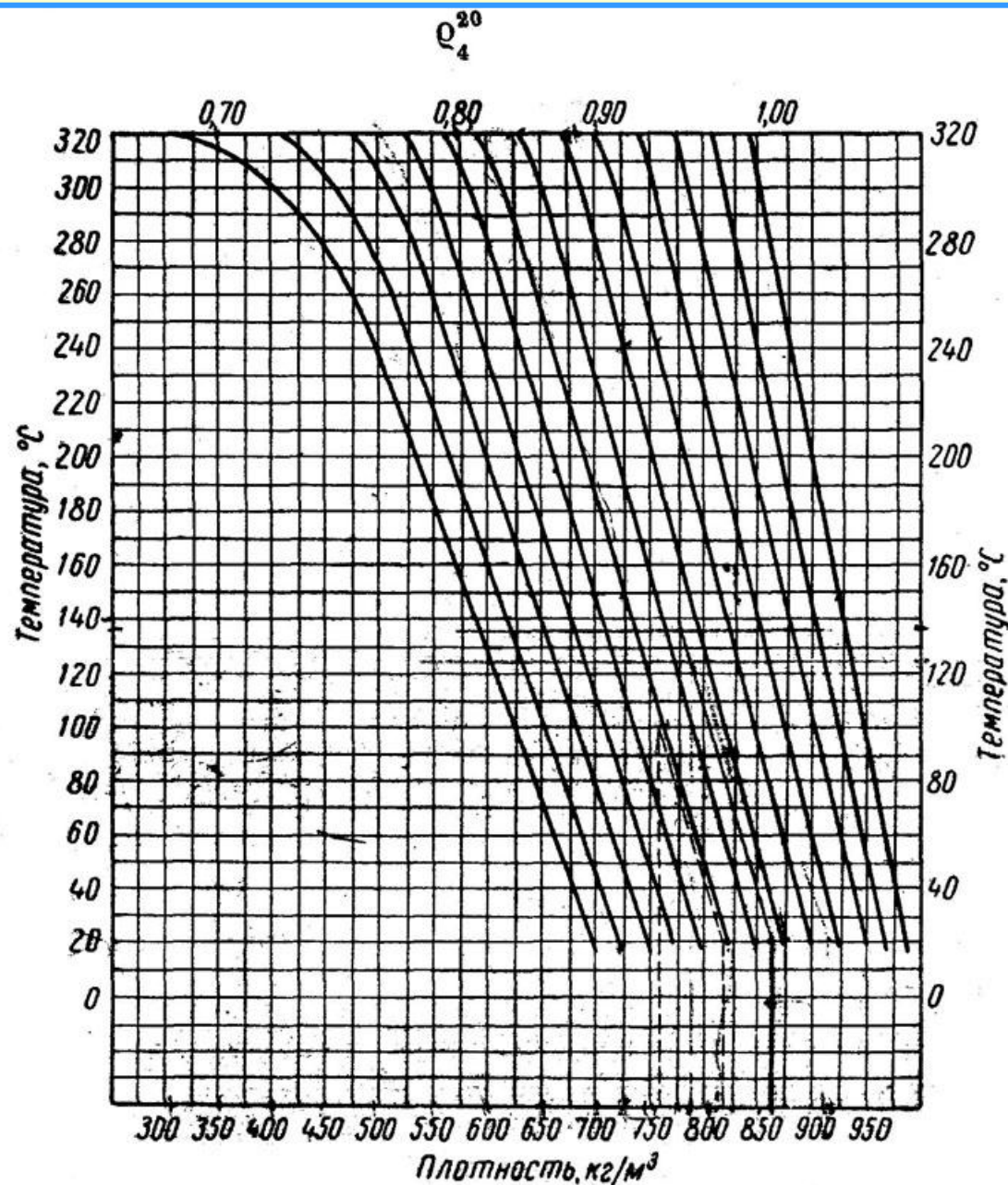
$$\rho_T = \rho_{293} [1 + \xi(293 - T)] \quad \text{или} \quad \rho_T = \rho_{293} - \zeta(T - 293)$$

где ρ_{293} – плотность при температуре 293 К, кг/м³; ξ – коэффициент объёмного расширения, К⁻¹, значения которого приводятся в специальных таблицах или рассчитываются: $\xi = \zeta / \rho_{293}$; ζ – температурная поправка, кг/(м³·К), которую можно рассчитать при помощи выражения:

$$\zeta = 1,825 - 0,001317 \rho_{293}$$

Отношение плотности нефтепродукта при 20°C к плотности дистиллированной воды при 4°C называется *относительной плотностью* ρ_4^{20} .

В технических расчётах для определения плотности нефтепродуктов при высоких температурах можно пользоваться графиком



Зависимость плотности нефтепродуктов от температуры

Плотность и удельный вес капельных жидкостей значительно выше, чем соответствующие характеристики упругих жидкостей (т.е. газов) и сравнительно мало изменяются под действием давления или при изменении температуры. Плотность газов с большей или меньшей степенью точности может быть рассчитана на основе уравнения состояния для идеальных газов (уравнения Менделеева–Клапейрона):

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

или

$$pV = nRT$$

где

p – давление, Па;

T – температура, К;

M – молярная масса газа, кг/моль;

$R = 8,31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная;

$n = m / M$ – количество вещества, моль.

Из этого уравнения следует, что

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

На основании уравнений состояния для идеальных газов (записанных для нормальных и рабочих условий), плотность ρ любого газа при температуре T и давлении p может быть рассчитана по формуле:

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0 p}{T p_0} = \frac{M}{22,4} \frac{273 p}{T p_0}$$

где $\rho_0 = M / 22,4$ – плотность газа при нормальных условиях, кг/м³.

Давление p и p_0 должны быть выражены в одинаковых единицах.

Плотность смеси газов (т.е. упругих жидкостей):

$$\rho_{\text{см}} = x_1 \rho_1 + x_2 \rho_2 + \dots$$

где $x_1, x_2, \dots$ – объёмные доли компонентов газовой смеси; $\rho_{\text{см}}, \rho_1, \rho_2, \dots$ – плотность газовой смеси и соответствующие плотности компонентов, кг/м³

Плотность газов зависит от давления и температуры.

Так как при движении по газопроводу давление уменьшается, то плотность газа снижается, и скорость его движения возрастает.

Таким образом, в отличие от нефтепроводов и нефтепродуктопроводов

транспортируемая среда в газопроводах движется с ускорением

Закон вязкого трения

Если для характеристик свойств жидкости используется модель вязкой **Ньютоновской жидкости**, то касательное напряжение $\sigma_{\text{тр}}$ полагается пропорциональным разности скоростей этих слоёв, рассчитанной на единицу расстояния между ними:

$$\sigma_{\text{тр}} = \mu \frac{dw}{dn}$$

Коэффициент пропорциональности μ в законе вязкого трения называется **коэффициентом динамической вязкости** или **динамическим коэффициентом вязкости**:

$$\mu = \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} \right] = [\text{Па} \cdot \text{с}] = \left[\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} \right]$$

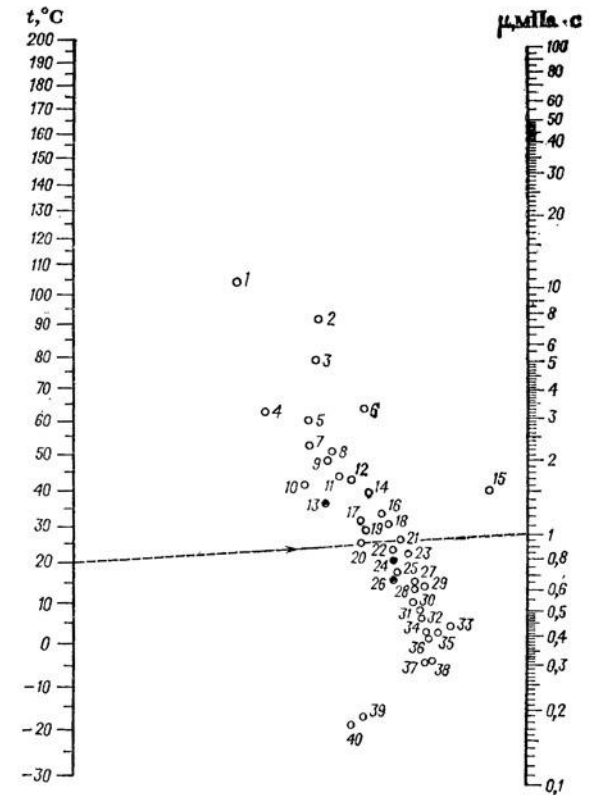
Определение μ жидкостей

Значения μ для жидкостей при различных температурах можно определить по номограмме, приведённой на рисунке.

При отсутствии экспериментальных данных динамический коэффициент вязкости многих органических жидкостей (при 20°C) приближённо может быть вычислен по следующей эмпирической формуле:

$$\lg(\lg \mu) = (\sum A_n + \sum p) \frac{\rho}{10^3 M} - 2,9$$

где μ — динамический коэффициент вязкости жидкости при атмосферном давлении и 20°C, мПа·с; ρ — плотность жидкости, кг/м³; M — молярная масса, кг/кмоль; A — число одноимённых атомов в молекуле органического соединения; n — численное значение атомной константы; p — поправка на группировку атомов и характер связи между ними



Номограмма для определения динамического коэффициента вязкости жидкостей при различных температурах.

Жидкость	Номер точки	Жидкость	Номер точки
Амилловый спирт	17	Пентан	38
Аммиак	39	Ртуть	15
Анилин	8	Серная кислота 111 %	2
Ацетон	34	Серная кислота 98 %	3
Бензол	25	Серная кислота 60 %	6
Бутиловый спирт	11	Сернистый ангидрид	35
Вода	20	Сероуглерод	33
Гексан	36	Терпентин	16
Гептан	31	Толуол	27
Глицерин, 100 %	1	Уксусная кислота, 100 %	18
Глицерин, 50 %	7	Уксусная кислота, 70 %	12
Диоксид углерода	40	Фенол	5
Диэтиловый эфир	37	Хлорбензол	22
Метилацетат	32	Хлороформ	29
Метилловый спирт, 100 %	26	Четырёххлористый углерод	21
Метилловый спирт, 90 %	24	Этилацетат	30
Метилловый спирт 30 %	13	Этиленгликоль	1
Нафталин	9	Этиленхлорид	23
Нитробензол	14	Этиловый спирт, 10 %	19
Октан	28	Этиловый спирт, 49 %	10

Вязкость смеси жидкостей

Для смеси нормальных (неассоциированных) жидкостей значение $\mu_{см}$ может быть вычислено по формуле:

$$\lg \mu_{см} = \chi_1 \lg \mu_1 + \chi_2 \lg \mu_2 + \dots$$

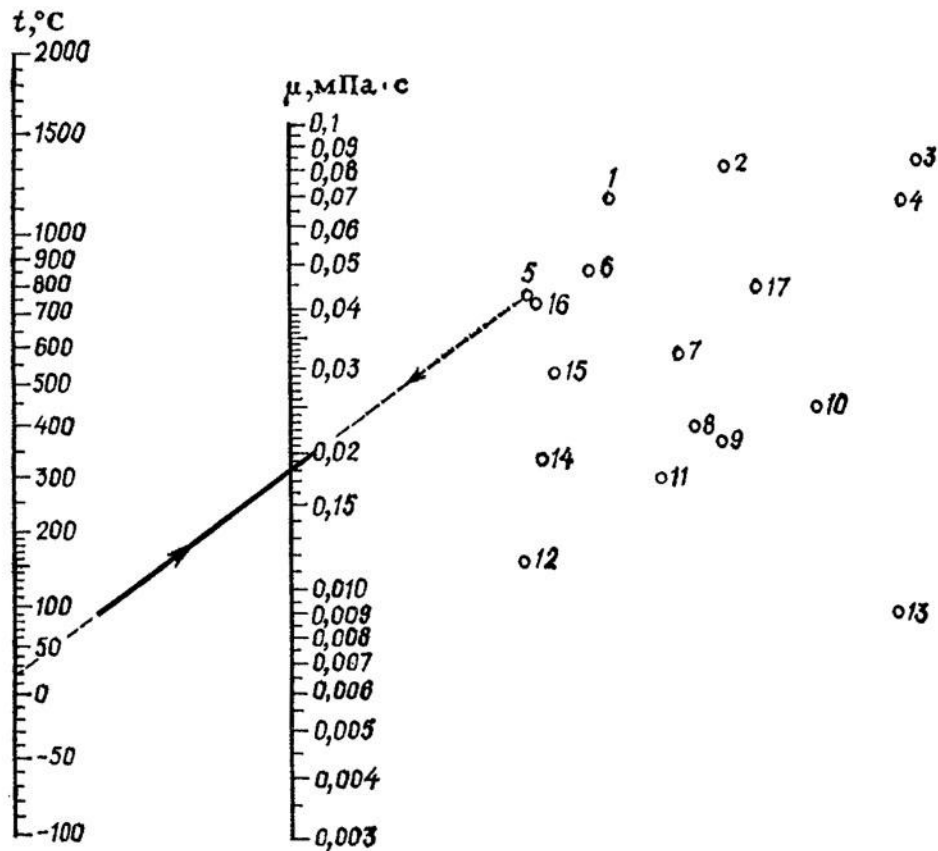
где $\mu_1, \mu_2, \dots$ — динамические коэффициенты вязкости отдельных компонентов; $\chi_1, \chi_2, \dots$ — молярные доли компонентов в смеси.

Вязкость смеси нормальных жидкостей может быть рассчитана также через объёмные доли компонентов по уравнению:

$$\frac{1}{\mu_{см}} = \frac{x_1}{\mu_1} + \frac{x_2}{\mu_2} + \dots$$

где $x_1, x_2, \dots$ — объёмные доли компонентов в смеси

Определение μ газов



Номограмма для определения динамического коэффициента вязкости газов при $p = 1$ атм *:

1 — O_2 ; 2 — NO ; 3 — CO_2 ; 4 — HCl ; 5 — воздух; 6 — N_2 ; 7 — SO_2 ; 8 — CH_4 ; 9 — H_2O ; 10 — NH_3 ; 11 — C_2H_6 ; 12 — H_2 ; 13 — C_6H_6 ; 14 — $9H_2 + N_2$; 15 — $3H_2 + N_2$; 16 — CO ; 17 — Cl_2 .

Пересчет в СИ: 1 атм = 760 мм рт. ст. = 101 325 Па.

* С допустимым приближением данными номограммы можно пользоваться и при давлении порядка нескольких атмосфер (нескольких десятков мегапаскалей).

Для определения динамического коэффициента вязкости газов при различных температурах можно использовать номограмму, приведённую на рисунке. Изменение динамического коэффициента вязкости газов с температурой выражается формулой:

$$\mu_T = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}}$$

где μ_0 — динамический коэффициент вязкости при 0°C , Па·с;

T — температура, К;

C — постоянная Сатерленда, К

Вязкость газовых смесей

Динамический коэффициент вязкости газовых (паровых) смесей может быть вычислен по приближённой формуле аддитивности:

$$\frac{M_{\text{см}}}{\mu_{\text{см}}} = \frac{x_1 M_1}{\mu_1} + \frac{x_2 M_2}{\mu_2} + \dots$$

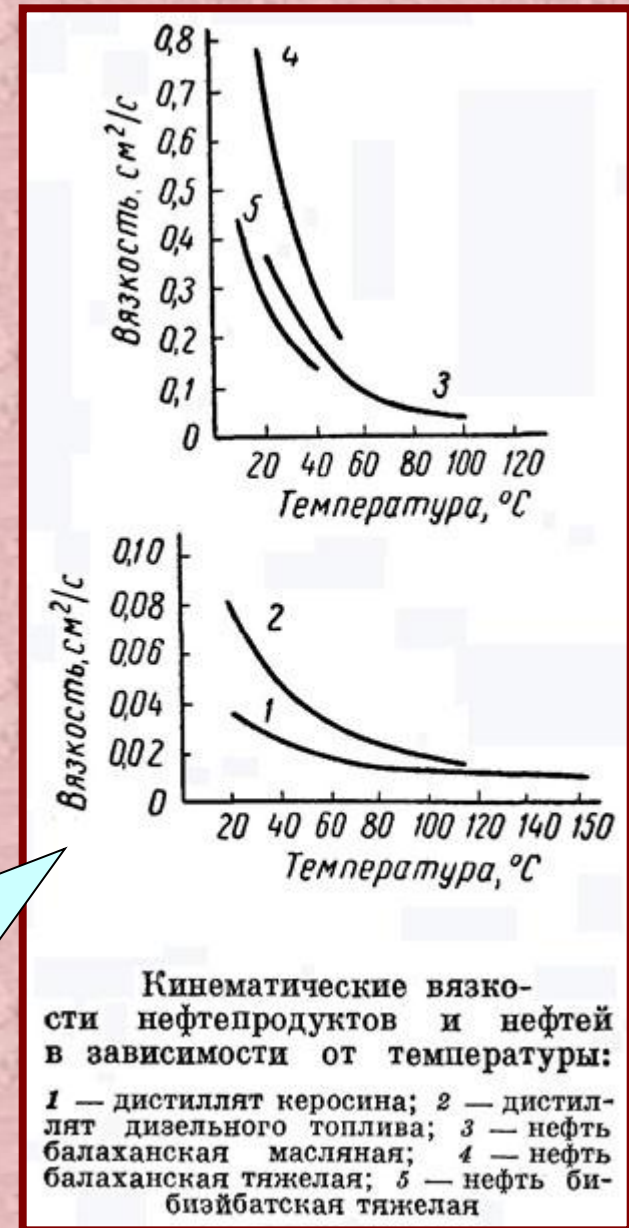
где $M_{\text{см}}$, M_1 , M_2 , ... — молярные массы смеси газов и отдельных компонентов; $\mu_{\text{см}}$, μ_1 , μ_2 , ... — соответствующие динамические коэффициенты вязкости; x_1 , x_2 , ... — объёмные (молярные) доли компонентов в смеси

Коэффициент кинематической вязкости

Коэффициент кинематической вязкости (или кинематический коэффициент вязкости) ν связан с коэффициентом динамической вязкости μ соотношением:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right]$$

Зависимость вязкости нефтей и нефтепродуктов от температуры может быть представлена в виде графиков, представленных на рисунках



Определение ν нефтепродуктов

При отсутствии графиков кинематическая вязкость ν_T при нужной (расчётной) температуре T (в К) может быть определена по формуле Рейнольдса—Филонова:

$$\nu_T = \nu_0 e^{-u(T-T_0)}$$

где ν_0 — кинематическая вязкость при температуре $T_0 = 273$ К (0°C); u — показатель крутизны вискограммы, K^{-1} .

Для определения величины u кроме ν_0 и T_0 достаточно иметь ещё одно значение вязкости ν_1 при какой-либо другой температуре T_1 . Тогда этот коэффициент находится по формуле:

$$u = \frac{\ln(\nu_0 / \nu_1)}{(T_1 - T_0)}$$

Давление

Давление в любой точке жидкости одинаково по всем направлениям, поскольку в противном случае также происходило бы перемещение жидкости внутри занимаемого ею объёма.

Приборы для измерения давления (**манометры** или **вакуумметры**) показывают не **абсолютное** давление $p_{\text{абс}}$ внутри замкнутого объёма, а разность между абсолютным и атмосферным, или барометрическим, давлением $p_{\text{атм}}$. Эту разность называют **избыточным** давлением $p_{\text{изб}}$, если давление в объёме превышает атмосферное, и **разрежением** $p_{\text{разр}}$, если оно ниже атмосферного. Таким образом

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{изб}} + p_{\text{атм}} = [\text{Па}]$$

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{атм}} - p_{\text{разр}} = [\text{Па}]$$

Расчёт плотности нефти в зависимости от давления

Для расчёта плотности нефти или нефтепродукта в зависимости от давления используется формула

$$\rho(p) = \rho_{293} [1 + \beta(p - p_{\text{атм}})] = \rho_{293} \left[1 + \frac{p - p_{\text{атм}}}{K} \right],$$

где β – коэффициент сжимаемости, Па^{-1} ;

$K = 1 / \beta$ – модуль упругости жидкости, Па.

Средние значения модуля упругости K для бензинов составляют $\approx 10^9$ Па (1000 МПа); для керосинов, дизельных топлив и нефтей $\approx 1,5 \cdot 10^9$ Па (1500 МПа).

Используется также обобщённая формула, учитывающая как барическое, так и тепловое расширение:

$$\rho(p, T) = \rho_{293} \left[1 + \xi(293 - T) + \frac{p - p_{\text{атм}}}{K} \right]$$

Давление столба жидкости

Давление столба (слоя) жидкости (газа или пара) высотой (толщиной) h в поле силы тяжести:

$$p = \rho g h,$$

где p – гидростатическое давление, Па; ρ – постоянная по высоте h плотность жидкости (газа или пара), в кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с² (на уровне моря $g = 9,807$ м/с²); h – высота (толщина), м.

Исходя из этого уравнения, получаем следующие соотношения между единицами давления:

физическая атмосфера

$$\begin{aligned} 1 \text{ атм} &= 760 \text{ мм рт. ст.} = \rho_{\text{рт}} g h = 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,76 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па} = \\ &= 1,033 \cdot 10^4 \text{ мм вод. ст.} = 1,033 \cdot 10^4 \text{ кгс/м}^2 = 1,033 \text{ кгс/см}^2 \end{aligned}$$

техническая атмосфера

$$\begin{aligned} 1 \text{ ат} &= 1 \text{ кгс/см}^2 = 10^4 \text{ кгс/м}^2 \text{ (мм вод. ст.)} = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па} = \\ &= 735 \text{ мм рт. ст.} \end{aligned}$$

Таблица перевода единиц давления

	Па	бар	кгс/см ²	атм	мм рт. ст.	мм вод. ст.
1 Па (Н/м ²)	1	10 ⁻⁵	1,01972 · 10 ⁻⁵	0,98692 · 10 ⁻⁵	750,06 · 10 ⁻⁵	0,101972
1 бар = = 10 ⁶ дин/см ²	10 ⁵	1	1,01972	0,98692	750,06	1,01972 · 10 ⁴
1 кгс/см ² = = 1 ат	0,980665 · 10 ⁵	0,980665	1	0,96784	735,56	10 ⁴
1 атм	1,01325 · 10 ⁵	1,01325	1,0332	1	760	1,0332 · 10 ⁴
1 мм рт. ст. (тор)	133,322	1,33322 · 10 ⁻³	1,35951 · 10 ⁻³	1,31579 · 10 ⁻³	1	13,5951
1 мм вод. ст.	9,80665	9,80665 · 10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	9,67841 · 10 ⁻⁵	7,3556 · 10 ⁻⁴	1

Уравнение

$$p = p_0 + \rho gh$$

представляет собой **основное уравнение гидростатики в интегральной форме**, по которому легко рассчитывается давление p (в Па) на любой глубине h (в м) от поверхности капельной жидкости постоянной плотности ρ (в кг/м³), если давление на уровне поверхности жидкости p_0 (в Па).

Кроме того, данное уравнение является выражением **закона Паскаля (закона гидростатики)**, согласно которому, давление на поверхность жидкости, произведённое внешними силами, передаётся жидкостью одинаково во всех направлениях.

Сила давления жидкости на плоскую стенку P (в Н):

$$P = (p_0 + \rho gh_c) S ,$$

где h_c — глубина погружения центра тяжести стенки под уровнем жидкости, м;
 S — площадь поверхности стенки, м²