

**ФОРМУЛА ДЛЯ РАСЧЕТА СКОРОСТИ
РАВНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ КАПЕЛЬ
В СТАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ СРЕДЫ**

Известно, что при расчете нефтеловушек и ряда химико-технологических процессов используются зависимости, определяющие скорость равномерного движения капель в статических условиях среды. В большинстве случаев при этом используют теоретическую формулу Стокса [1]

$$v = \frac{d^2 \Delta \rho g}{18\mu}, \quad (1)$$

где v и d — скорость движения и диаметр капель; $\Delta \rho$ — разность плотностей среды и капли; μ — коэффициент динамической вязкости среды; g — ускорение силы тяжести.

В зарубежной литературе рекомендуется введение в формулу Стокса коэффициента C_v , выражающего влияние вязкости капель на скорость их равномерного движения [1]. Таким образом,

$$v = C_v \frac{d^2 \Delta \rho g}{18\mu}, \quad (2)$$

где $C_v = \frac{2\mu + 3\mu_1}{3\mu + 3\mu_1}$; μ_1 — коэффициент динамической вязкости капель.

Для расчета скорости всплывания капель нефти в нефтеловушках ВНИИ ВОДГЕО рекомендует использовать эмпирическую формулу [1]

$$v = (0,0112 - 0,0093\gamma_1) \cdot 10^{143d} \text{ см/сек}, \quad (3)$$

где γ_1 — удельный вес нефти, г/см; d — диаметр частиц нефти, см.

В результате экспериментальных исследований установлено [2], что для твердых шариков формула Стокса не может дать удовлетворительных результатов ни при каких значениях чисел Re . Лишь при стремлении $Re \rightarrow 0$ скорость движения твердого шара стремится к величине, определяемой по формуле Стокса (1). Применение же формулы Стокса для расчета

скорости движения капель без экспериментальной проверки вообще не обосновано [3].

В опытах установлено [4, 5], что вязкость жидкостей капель не влияет на конечную скорость движения.

Эмпирическая формула (3) применима в узком диапазоне размеров частиц, а при малейших отклонениях от тех условий, при которых была она выведена, оказываются большие расхождения между расчетными и фактическими данными.

Ранее нами установлено [6], что сила сопротивления движению частицы сферической формы в вязкой среде равна

$$F = C_a \mu d v + K \pi d \frac{\rho v^2}{2} + C_d \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho v^2}{2}, \quad (4)$$

где C_a — коэффициент вязкого сопротивления; C_d — коэффициент динамического давления жидкости, отнесенный к площади миделя движущейся частицы; $K = \frac{b}{\sqrt[3]{\frac{\Delta \rho \cdot \rho g}{\mu^2}}}$;

b — постоянный коэффициент, зависящий от формы частиц.

По данным наших исследований [7], движения капель толуола в воде при температуре 20 °C ($\Delta \rho = 0,134 \text{ г/см}^3$; $\rho = 1,0 \text{ г/см}^3$; $g = 981 \text{ см/сек}^2$; $\mu = 0,01 \text{ пуаз}$) $K = 0,0312$; $b = 3,5$; $C_a = 2\pi$; $C_d = 0,25$.

Из равенства силы сопротивления (4) эффективному весу капли находим

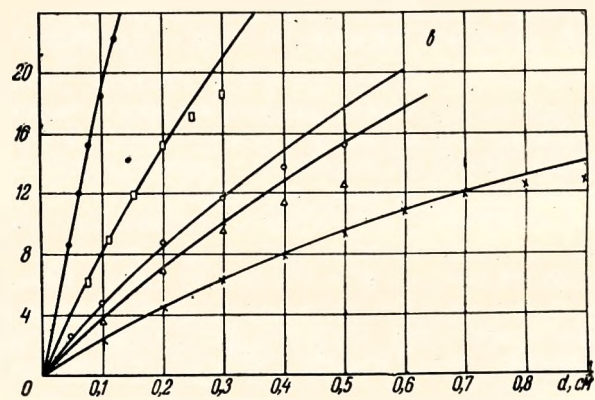
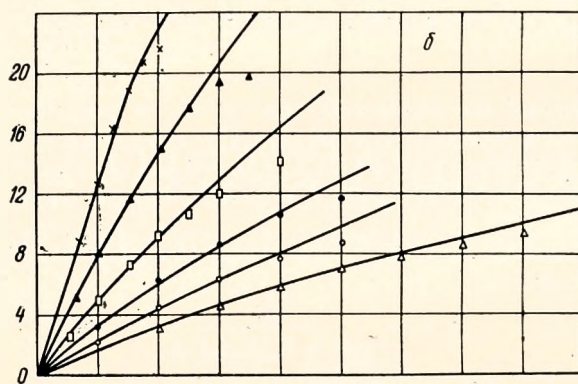
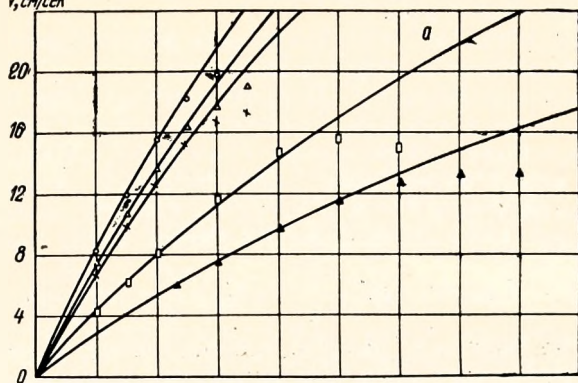
$$v = - \frac{2\mu}{(K + 0,0625d)\rho} + \sqrt{\left[\frac{2\mu}{(K + 0,0625d)\rho} \right]^2 + \frac{d^2 \Delta \rho g}{3(K + 0,0625d)\rho}}. \quad (5)$$

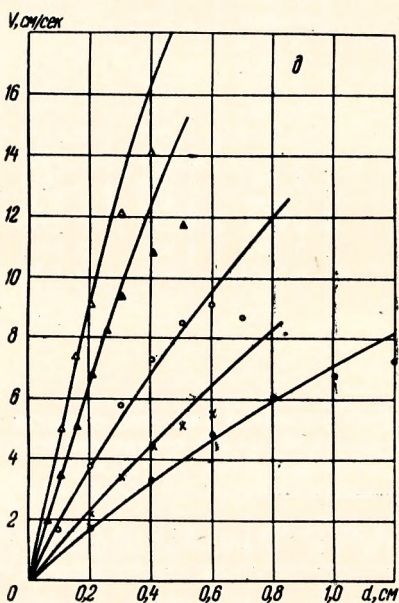
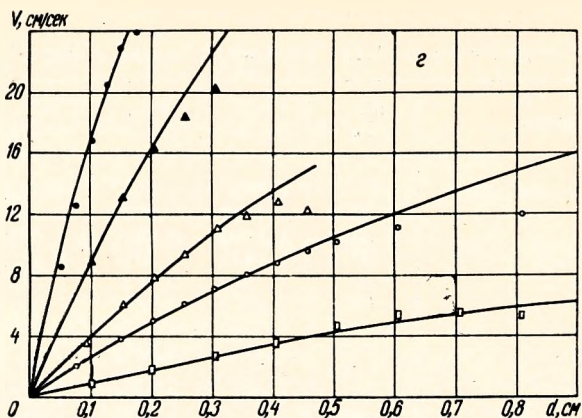
Сопоставление расчетных по (5) и опытных данных [4—5] о скорости движения капель различных органических жидкостей в воде показало хорошую степень совпадения (см. рисунок). В опытах [4—5] исследовалось движение капель в широких диапазонах изменения $\Delta \rho$ ($\Delta \rho = 0,0179—1,943$) и μ_1 ($\mu_1 = 0,0047—0,2706$) (табл. 1) для 25 различных органических жидкостей. Из сопоставления рис. а, б, в видно, что зависимость (5) подтверждается примерно до чисел $Re = 330$. При значениях чисел $Re > 330$ происходит значительная деформация капель. Более точно размер капель, выше которого нельзя пренебрегать деформацией, можно определить по формуле [8]

$$d = \sqrt{\frac{0,4\sigma}{\Delta \rho g}}, \quad (6)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения, *дин/см*.

$V, \text{cm/sek}$





Зависимости $v=f(d)$ при движении капель различных жидкостей в воде. а: четыреххлористый углерод (○), хлорбензол (▲), бромбензол (△), этил бромистый (×), нитробензол (□); б: изо-эвгенол (○), этилфталат (●), *n*-бутилфталат (△), четыреххлористый углерод (▲), 1,2-дибромэтилен (×), карбондисульфид (□); в: о-нитротолуол (△), 1, 1, 2-тетрабромэтан (●), 1-хлорнафталин (○), дифениловый эфир (×), 1, 1, 2, 2-тетрахлорэтан (□); г: хлорбензол ($\sigma=24,54$) (○), метилфталат (△), тетрахлорэтилен (▲), бромоформ (●), анилин (△); д: *n*-амилфталат ($\sigma=20,20$) (●), эвгенол (○), нитробензол ($\sigma=15,84$) (▲), карбондисульфид (△), *m*-крезол (×); расчет по формуле (5)

Физические свойства жидкостей капель и среды

Жидкость	$\rho_{ср}^*$ г/см ³	$\rho_{к}^*$ г/см ³	$\mu_{ср}^*$ С пуаз	$\mu_{к}^*$ С пуаз	σ , $\frac{\text{дин}}{\text{см}}$
Четыреххлористый углерод	0,9970	1,5857	0,8937	0,9291	45,30
Хлорбензол	0,9970	1,1040	0,8937	0,7822	36,81
Бромбензол	0,9970	1,4900	0,8937	1,0730	38,12
Этил бромистый	0,9970	1,4445	0,8937	0,4777	31,09
Нитробензол	0,9970	1,1980	0,8937	1,7839	26,08
Изо-эвгенол	0,9991	1,083	0,9499	27,06	9,38
Этилфталат	0,9995	1,128	0,9759	10,86	14,40
<i>n</i> -Бутилфталат	0,9981	1,044	0,9499	15,38	23,61
Четыреххлористый углерод	0,9989	1,584	0,9156	1,048	44,66
Карбондисульфид	0,9991	1,260	0,9499	0,6531	45,67
1,2-Дибромэтилен	0,9989	2,17	0,9156	1,752	36,58
о-Нитротолуол	0,9961	1,153	0,7848	1,666	26,03
1,1,2,2-Тетрабромэтан	0,9960	2,939	0,7809	5,495	33,35
1-Хлорнафталин	0,9953	1,200	0,7660	2,289	41,90
Дифениловый эфир	0,9861	1,067	0,7848	2,633	40,80
1,1,2,2-Тетрахлорэтан	0,9981	1,581	0,8280	1,452	30,09
Хлорбензол	0,9980	1,088	0,8280	0,7877	24,54
Метилфталат	0,9961	1,180	0,9961	9,383	12,26
Тетрахлорэтилен	0,9961	1,609	0,7848	0,9497	43,48
Бромформ	0,9989	2,850	0,9156	2,127	40,60
Анилин	0,9981	1,016	0,8280	2,835	6,545
<i>n</i> -Амилфталат	0,9981	1,016	0,8280	18,49	20,20
Эвгенол	0,9981	1,058	0,8280	5,43	12,34
Нитробензол	0,9981	1,157	0,8280	1,838	15,84
<i>m</i> -Крезол	0,9981	1,028	0,8280	7,732	4,134

Таблица 2

Сопоставление расчетных значений скорости движения капель нефти ($\rho_{н}=0,866$ г/см³) в воде при температуре 20 °С по формулам (1), (3) и (5)

d , см	0,0025	0,0050	0,0075	0,0100	0,0125	0,015	0,020	0,025	0,030	0,035
v , $\frac{\text{см}}{\text{сек}}$ (5)	0,0063	0,0260	0,0570	0,0986	0,149	0,206	0,330	0,479	0,630	0,786
v , $\frac{\text{см}}{\text{сек}}$ (1)	0,0043	0,0177	0,0400	0,0710	0,111	0,160	0,284	0,443	0,638	0,868
Δv (5,1), %	31,8	31,9	42,5	28,0	25,5	22,3	13,9	7,53	1,27	10,4
v , $\frac{\text{см}}{\text{сек}}$ (3)	0,0070	0,0163	0,0372	0,0849	0,194	0,440	2,287	—	—	—
Δv (5,3), %	11,1	37,2	34,7	13,9	30,2	—	—	—	—	—

Сопоставление расчетных данных о скорости движения капле нефти ($\rho_n = 0,866 \text{ г/см}^3$) в воде при температуре 20°C по формулам (1), (3) и (5) дано в табл. 2, из которой видно, что расчетные значения по формулам (1), (3) значительно отличаются от расчетных значений по формуле (5), аппроксимирующей опытные данные. В пределах размеров частиц до 100 мк формула Стокса дает расхождения в 42% , формула ВНИИ ВОДГЕО — в 37% по сравнению с расчетными значениями по формуле (5). Для более крупных капель расхождения еще значительнее.

Намн рекомендуется использовать для расчета скорости всплывания или осаждения одиночной капли формулу (5), которая дает хорошую степень совпадения с результатами опытов и проверена на обширном опытном материале.

Пример. Определить размеры нефтеловушки для сточных вод нефтепромысла с использованием расчетной формулы (5) при расчетном расходе сточных вод $q = 220 \text{ л/сек}$; содержании нефти 5000 мг/л ; температуре сточной жидкости 20°C (плотность воды $\rho_v = 1 \text{ г/см}^3$; вязкость воды $\mu_v = 0,01 \text{ пуаз}$; плотность нефти $\rho_n = 0,866 \text{ г/см}^3$); расчетном диаметре нефтяных частиц, выделяемых в нефтеловушке, $d = 80 \text{ мк}$ ($0,008 \text{ см}$).

Скорость всплывания нефтяных частиц по расчетной формуле (5) определится следующим образом:

$$K = \sqrt[3]{\frac{3,5}{0,134 \cdot 1,0 \cdot 981}} = 0,0312;$$

$$v = - \frac{2 \cdot 0,01}{(0,0312 + 0,0625 \cdot 0,008)} +$$

$$+ \sqrt{\left[\frac{2 \cdot 0,01}{(0,0312 + 0,0625 \cdot 0,008)} \right]^2 + \frac{0,008^2 \cdot 0,134 \cdot 981}{(0,0312 + 0,0625 \cdot 0,008)}} = 0,064 \text{ см/сек}$$

Горизонтальную скорость течения в нефтеловушке u принимаем равной 5 мм/сек ($0,005 \text{ м/сек}$).

Площадь поперечного сечения нефтеловушки

$$f = \frac{q}{u} = \frac{0,22}{0,005} = 44 \text{ м}^2.$$

По конструктивным соображениям в соответствии с типовыми размерами железобетонных изделий и оборудования принимаем ширину одной секции нефтеловушки в чистоте, равной 6 м . Берем четыре секции. Тогда рабочая глубина

$$h = \frac{f}{B} = \frac{44}{6 \cdot 4} = 1,8 \text{ м}.$$

При найденной ширине всех четырех секций нефтеловушки $B=6 \cdot 4=24$ м и глубине сточной жидкости $h=1,8$ м определяем длину отстойной части нефтеловушки. Поправочный коэффициент α , учитывающий турбулентность и струйность потока, при горизонтальной скорости течения $u=0,005$ м/сек принимаем равным 1,5. Тогда

$$l = \alpha \frac{uh}{v} = 1,5 \frac{0,005 \cdot 1,8}{0,00064} = 21 \text{ м.}$$

Время пребывания сточной жидкости в нефтеловушке

$$t = \frac{l}{u} = \frac{21}{0,005} = 4200 \text{ сек} \approx 1,2 \text{ час.}$$

Полезный объем одной секции нефтеловушки

$$W = b \cdot l \cdot h = 6 \cdot 21 \cdot 1,8 = 227 \text{ м}^3.$$

Сопоставление параметров при расчете нефтеловушек при указанных выше условиях по формулам (1), (3) и (5) дано в табл. 3, из которой видно, что размеры нефтеловушек, расчи-

Таблица 3

Сопоставление параметров при расчете нефтеловушек по формулам (1), (3) и (5)

Расчетная формула	Расчетный параметр						
	$v, \frac{\text{см}}{\text{сек}}$	$u, \frac{\text{см}}{\text{сек}}$	$f, \text{ м}^2$	$h, \text{ м}$	$l, \text{ м}$	$t, \text{ час}$	$W, \text{ м}^3$
(1)	0,0468	0,5	44	1,8	29	1,6	313
(3)	0,0438	0,5	44	1,8	30	1,7	335
(5)	0,0640	0,5	44	1,8	21	1,2	227

танные по формулам (1), (3), оказываются завышенными. В сопоставлении с расчетом по формуле (5) полезный объем секции нефтеловушки и время отстаивания сточной жидкости при расчете по формуле Стокса оказываются завышенными на 38 %, а по эмпирической формуле ВНИИ ВОДГЕО — на 47 %.

При наличии же факторов, затрудняющих или облегчающих процессы отстаивания нефтесодержащих сточных вод, их следует учитывать отдельно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атлас М. И., Литвишков Н. М. Справочник по водоснабжению и канализации предприятий нефтяной промышленности. Азербайджан. Баку, 1958.
2. Maxworthy T. Точные измерения сопротивлений сферы при малых числах Рейнольдса. «J. Fluid Mech.», 23, № 2, 369—372, 1965.
3. Кравцов М. В. Факторы, определяющие процесс всплывания эмульгированных нефтепродуктов. В сб.: «Вопросы водного хозяйства Белоруссии». Минск, 1965.
4. Johnson A. I., Braida L. Скорость падения, циркуляция и колебание падающих капель в неподвижной жидкости. «Canad. J. Chem. Engng.», 35, 165, 1957.
5. Krishna P. M., Wenkateswarlu D., Narasimhamurti G. S. R. Падение жидких капель в воде. Результирующие скорости. «J. Chem. and Engng. Data», 4, № 4, 1959.
6. Кравцов М. В. Сопротивление свободному установившемуся движению сферы в вязкой среде. Инженерно-физический журнал, т. XV, № 3, 1968.
7. Кравцов М. В. Применение седиментометрического анализа для исследования скорости расслоения нефтесодержащих сточных вод. В сб.: «Использование и охрана водных ресурсов Белоруссии», ч. 1. Минск, 1966.
8. Davies J. T. Mass-Transfer and Interfacial Phenomena. «Advances in Chem. Engng.», v. 4, Ac. press. New York—London, 33—42, 1963.

коллекторах дождевой канализации г. Минска (БПК, окисляемость, концентрации взвесей, эфирорастворимых веществ, хлоридов, бактериальных загрязнений).

Изложены расчетные зависимости и схема определения влияния загрязнений, смываемых с городской территории, на кислородный режим приемников стока.

Таблиц 1, рисунков 2, библиогр. 29.

УДК 628.543

Состояние отведения, очистки и использования производственных сточных вод на основных предприятиях Могилевской области. Суханов В. Н. «Водоотведение и очистка вод». Минск, 1969, стр. 42—49.

Рассмотрены вопросы водоснабжения и канализации наиболее водоемких предприятий Могилевской области, дана краткая оценка их водного хозяйства, а также выявлены основные недостатки в очистке и использовании производственных сточных вод.

Таблиц 5, библиогр. 5.

УДК 628.311

Оценка ускоренных способов определения расходов воды в открытых потоках. Балаескул Н. М. «Водоотведение и очистка вод». Минск, 1969, стр. 50—61.

Изложена методика определения расходов воды при применении поля мгновенных скоростей с одновременным сокращением числа вертикалей. Приводятся результаты исследования по 50 расходам. Предлагается сокращенный способ определения расходов в условиях неустановившегося движения.

Таблиц 2, рисунков 3, библиогр. 9.

УДК 628.3

К вопросу определения притока бытовых сточных вод. Лапцкая М. П. «Водоотведение и очистка вод». Минск, 1969, стр. 62—63.

Дается анализ существующего в практике проектирования метода определения притока сточных вод от населения по часам суток, показывается его несовершенство и рекомендуется более правильный способ распределения суточного водоотведения по часам суток.

Рисунков 1.

УДК 628.33

Формула для расчета скорости равномерного движения капель в статических условиях среды. Кравцов М. В. «Водоотведение и очистка вод». Минск, 1969, стр. 64—71.

Предложена общая формула для расчета скорости равномерного движения капель в спокойной жидкости, которая проверена на обширном опытном материале и может быть применена при рас-

чете нефтеловушек и химико-технологических процессов разделения двухфазных жидкостей.

Рисунков 1, таблиц 3, библиогр. 8.

УДК 628.334.132+628,356.56

Применение микрофильтров для очистки сточных вод.

Шляпников Л. Л. «Водоотведение и очистка вод».

Минск, 1969, стр. 72—81.

Излагается схема работы микрофильтра, рассматриваются вопросы промывки загрязненной сетки, способ очистки грязных промывных вод от микрофильтра и влияние скорости вращения барабана на эффект доочистки биохимически очищенных сточных вод.

Таблиц 4, рисунков 7, библиогр. 11.

УДК 628.34

Очистка сточных вод электрохимическим методом.

Аркасов Г. А. «Водоотведение и очистка вод». Минск,

1969, стр. 82—90.

На основе анализа современного состояния электрохимического метода очистки сточных вод доказывається перспективность метода электролитического коагулирования для очистки сточных вод, содержащих масла, эмульсии, нефтепродукты и тонкодисперсную взвесь.

Таблиц 3, библиогр. 22.

УДК 628.543

Очистка и использование цианосодержащих сточных вод

гальванических цехов. Булатова А. А. «Водоотведе-

ние и очистка вод». Минск, 1969, стр. 91—101.

Освещены современные методы очистки цианосодержащих сточных вод гальванических цехов, используемые как у нас, так и за рубежом. Рассматривается возможность повторного использования этих стоков после обезвреживания.

Таблиц 3, рисунков 1, библиогр. 19.

УДК 628.543

Рациональная схема отведения и обезвреживания хром-

содержащих сточных вод гальванических цехов. Брук-

Левинсон Т. Л., Костян Л. П. «Водоотведение и

очистка вод». Минск, 1969, стр. 102—108.

На основе анализа недостатков применяемых схем и результатов проведенных исследований предлагается рациональная схема отведения и обезвреживания хромсодержащих сточных вод совместно с другими видами кислых и щелочных вод (кроме цианосодержащих). Рекомендованная схема, обеспечивая высокую степень очистки, позволяет снизить строительные и эксплуатационные затраты.

Таблиц 2, рисунков 2, библиогр. 11.