

ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ НЕРАСТВОРИМЫХ ПРИМЕСЕЙ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СТОКАХ С ТЕРРИТОРИЙ АВТОТРАНСПОРТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

DISPERSION ANALYSIS OF INSOLUBLE IMPURITIES OF SURFACE EFFLUENTS FROM THE TERRITORIES OF MOTOR TRANSPORT ENTERPRISES

В настоящее время обострилась проблема загрязнения отводимых атмосферных вод нефтепродуктами и взвешенными твердыми частицами. Дисперсный состав примесей в подобных стоках практически не изучен, предлагаемые для них локальные очистные сооружения несовершенны, методы их расчета проработаны слабо. Целью данного исследования является анализ дисперсионного состава поверхностных сточных вод с территории автотранспортного предприятия для расчета входящих в состав очистных сооружений коалесцентных сепараторов. Выполнено экспериментальное исследование распределения по размерам капель нефтепродуктов и твердых взвесей в ливневых и талых сточных водах. Показано, какие размеры капель нефтепродуктов и твердых частиц преобладают в стоках. Проведены численные эксперименты по предложенной ранее математической модели и нашим лабораторным исследованиям, результаты которых позволяют ожидать высоких значений степени очистки стоков от эмульгированных нефтепродуктов в коалесцентном сепараторе.

Ключевые слова: автотранспортные предприятия, поверхностный сток, ливневые и талые воды, дисперсионный состав примесей, очистка от нефтепродуктов, коалесцентный сепаратор.

At present, the problem of pollution of discharged atmospheric waters with oil products and suspended solids has become more acute. The disperse composition of impurities in such effluents is practically not studied, the local treatment facilities proposed for them are imperfect, and the methods of their calculation are poorly developed. The purpose of this study is to analyze the dispersion composition of surface wastewater from the territory of a motor transport enterprise for the calculation of coalescent separators included in the treatment facilities. There has been performed an experimental study of the size distribution of petroleum product droplets and solid suspensions in storm water and melt water. It is shown which sizes of droplets of petroleum products and solid particles prevail in wastewater. Numerical experiments according to the previously proposed mathematical model and our laboratory studies have been carried out, the results of which allow us to expect high values of the degree of effluent purification from emulsified oil products in the coalescent separator.

Keywords: motor transport enterprises, surface runoff, storm water and melt water, dispersion composition of impurities, purification from petroleum products, coalescent separator.

Введение

В современных условиях быстро возрастающего количества автотранспорта в городах и населенных пунктах резко обо-

стрилась проблема загрязнения отводимых поверхностных (ливневых и талых) вод масло- и нефтепродуктами, а также взвешенными твердыми частицами. Особенно сильно

загрязняются поверхностные стоки с территорий автотранспортных предприятий (АТП), автозаправочных станций и станций технического обслуживания автомобилей. Сброс подобных стоков без очистки в общегородскую ливневую канализацию категорически недопустим из-за высокого содержания нефтепродуктов. Для их обезвреживания должны применяться локальные очистные сооружения, одной из эффективных ступеней которых могут быть коалесцентные сепараторы нефтепродуктов. Однако из-за отсутствия научно обоснованных методов расчета и конструирования такие устройства до сих пор не получили широкого распространения. Используемые немногочисленные аппараты данного типа имеют несовершенную конструкцию и работают далеко не в оптимальных режимах.

В Санкт-Петербургском государственном технологическом институте была разработана новая конструкция [1] и математическая модель [2] коалесцентного сепаратора нефтепродуктов, предназначенного для очистки поверхностных сточных вод.

Поскольку математическая модель аппарата требует ввода в качестве исходных данных дисперсного состава капель и твердых частиц в сточной жидкости, для расчета коалесцентного сепаратора необходимо лабораторное определение распределения твердых частиц и капель нефтепродуктов по размерам в реальных стоках с территории автотранспортного предприятия.

Цель настоящей работы — исследование дисперсного состава примесей поверхностных сточных вод, отводимых на очистку с территорий автотранспортных предприятий.

Научные исследования последних лет [3–6] показывают, что поверхностный сток, поступающий с автострад, автомагистралей с интенсивным движением грузового автомобильного транспорта, мостов и эстакад имеет особый состав, существенно отличающийся от состава стоков с селитебных

территорий. Концентрация нефтепродуктов в таких стоках может достигать нескольких сотен миллиграммов в литре [7–9].

Для поверхностных стоков селитебных зон характерно содержание нефтепродуктов до 20 мг/л. В то же время в работе [7] определено, что в поверхностном стоке с территории стоянки тяжелого грузового автотранспорта концентрация нефтепродуктов достигает 340 мг/л. В исследовании Фельдштейна [9] показано, что ливневый сток с территории АЗС может содержать до 490 мг/л нефтепродуктов, талый сток — до 1020 мг/л. В ливневых сточных водах с территорий автотранспортных предприятий концентрация нефтепродуктов достигает 350 мг/л, в талых водах — 960 мг/л [9].

Помимо нерастворимых дисперсных примесей, поверхностные стоки с территории предприятий автотранспортного комплекса содержат в своем составе растворенные органические вещества (до 100–140 мг/л в пересчете на БПК₂₀) и неорганические соединения, в частности, соли, используемые для антиобледенительной обработки территории в зимний период, и соли тяжелых металлов (суммарно до 10–15 мг/л) [10, 11].

В настоящее время в качестве локальных сооружений для обезвреживания поверхностных сточных вод с территории АТП, как правило, используются установки с несколькими ступенями очистки стоков различными методами. Блок механической очистки включает решетку для отделения крупного мусора, песколовку, отстойник-нефтеловушку, флотатор, фильтр с зернистой загрузкой. Для удаления растворенных веществ обычно применяют фильтр-адсорбер. Технологические узлы могут быть размещены в едином корпусе или в отдельных подземных емкостях. Установки работают по проточной схеме как элемент самотечной водосборной ливневой сети без аккумулирующего резервуара. Такая схема, по мнению разработчиков, существенно повышает экономич-

ность и конкурентоспособность локальных очистных сооружений в сложных условиях строительства и дефицита свободных площадей. В отдельных модификациях установок в состав основного оборудования входит тонкослойный отстойник, а также узел коалесцентной очистки от нефтепродуктов в слое гранулированной зернистой загрузки из специальных полимерных материалов. Конечная концентрация загрязнений после таких сооружений заявляется разработчиками на уровне 5–20 мг/л взвешенных веществ и 0,3–2 мг/л нефтепродуктов, что не может соответствовать действительности, поскольку растворимость нефтепродуктов в воде составляет от 2 до 4 мг/л, а механическими методами растворенные вещества удалить невозможно. Проточная схема без накопления и усреднения поверхностного стока в аккумулирующем резервуаре приводит к колебаниям скорости движения сточной воды через установку в чрезвычайно широком диапазоне (в зависимости от интенсивности выпадающих осадков). В результате сооружения большую часть времени работают в режиме, далеком от оптимального, что не позволяет добиваться требуемой эффективности очистки воды.

Коалесцентные сепараторы нефтепродуктов со слоями полимерных гранул имеют низкую пропускную способность по воде, требуют частой промывки и регенерации.

Кроме того, практически отсутствуют научно обоснованные методики расчета и проектирования узла коалесцентной сепарации, что не позволяет в полной мере использовать возможности коалесцентного метода, сдерживает его внедрение в практику очистки воды.

За рубежом появились установки для очистки сточных вод от нефтепродуктов с использованием гофрированных коалесцентных пластин [12–17], однако методики расчета подобных устройств в научно-технической литературе также отсутствуют.

Известно, что на степень очистки сточной воды от нефтепродуктов в коалесцентных сепараторах большое влияние оказывает распределение дисперсной фазы по размерам. Эффективность улавливания крупных капель нефтепродуктов намного выше, чем мелких. В то же время дисперсный состав примесей, смываемых ливневыми и талыми водами с территорий автотранспортных предприятий, до сих пор подробно не изучен.

Методы

Реальная сточная вода обычно содержит эмульгированные и суспендированные примеси, которые образуют полидисперсную систему капель и твердых частиц, всплывающих и оседающих с различной скоростью. Дисперсионный состав содержащихся в ливневом и талом стоке капель нефтепродуктов и твердых взвесей определяли в системе из нескольких стеклянных цилиндров методом расслаивания трехфазной сточной воды во времени с последующим отбором и анализом нижних и верхних отстоявшихся объемов и определения в них концентрации нефтепродуктов на приборе «Флюорат», а концентрации твердых взвесей — стандартным гравиметрическим методом.¹

Для оценки распределения капель по скоростям всплывания (а значит, и по размерам) была использована экспериментальная установка, показанная на рис. 1, а. Для выполнения анализа необходимы пробоотборник, стеклянные цилиндры (не менее пяти, в нашем случае 10), секундомер, часы, колбы и делительные воронки. Пробоотборником отбирали пробу сточной воды и разливали по установленным цилиндрам. Одновременно отбирали пробу для определения исходной концентрации нефтепродуктов $c_{\text{н}}$.

Воду разливали по цилиндрам, засекали время начала отстаивания в каждом из них. Предварительно задавались интервалами

¹ ПДН Ф 14.1.2:4.254–2009. Методика измерений массовых концентраций взвешенных веществ в пробах питьевых, природных и сточных вод гравиметрическим методом. М.: ФС по надзору в сфере природопользования, 2012. 14 с.

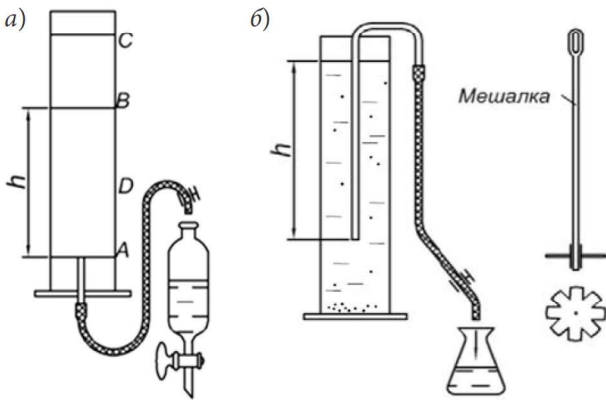


Рис. 1. Схемы лабораторных установок для определения распределений в сточной воде: а — капель нефтепродуктов по скоростям всплывания; б — твердых частиц по скоростям осаждения

продолжительности отстаивания в каждом цилиндре (в нашем случае 1,5; 3; 6; 12; 24; 48; 136; 272; 544 и 600 мин). После истечения времени отстаивания из соответствующих цилиндров отбирали нижний слой h всего столба отстаивания (см. рис. 1, а). Для этого предварительно на стенках цилиндров делали четыре отметки: А, В, С, D. Расстояние между метками А и В соответствует заданной высоте отстаивания h . Уровень, соответствующий метке С, означает предел наполнения цилиндра. Отметка D означает уровень, до которого необходимо опорожнить цилиндр при отборе осветленной воды. Объем AD равен объему ВС.

В пробах воды, отобранных через заданные интервалы времени τ , по известной принятой методике с помощью прибора «Флюорат» определяли концентрацию нефтепродуктов c_τ . Затем, исходя из начальной концентрации нефтепродуктов в изучаемой воде c_n , рассчитывали эффективность (в %) отделения нефтепродуктов отстаиванием к моменту времени τ за заданные интервалы времени по формуле

$$\eta_\tau = 100 (c_n - c_\tau) / c_n. \quad (1)$$

По вычисленным значениям был построен график $\eta_\tau = f(\tau)$, фактически определяющий кинетику всплывания нефтепродуктов в исследуемой воде.

Любой сепаратор, в том числе и отстойный цилиндр, удаляет капли крупнее определенного размера и оставляет в эмульсии капли меньшего размера. За время τ из нижней части цилиндра высотой h (между метками А и В) выйдут все капли, имеющие скорость всплывания

$$w_{всп} \geq h / \tau. \quad (2)$$

Следовательно, функция распределения капель по скоростям всплывания

$$R(w_{всп}) = \eta_\tau. \quad (3)$$

Скорость всплывания капель с размерами порядка десятков и сотен микрон может быть определена по формуле Стокса (4) с поправкой $k < 1$, учитывающей [18] подвижность границы раздела фаз нефть–вода:

$$w_{всп} = \frac{\delta_k^2 (\rho_B - \rho_H) g}{18 \mu_B k}, \quad (4)$$

где ρ_B, ρ_H — плотности соответственно воды и нефтепродуктов, кг/м³;

$$k = \frac{2\mu_B + 3\mu_H}{3(\mu_B + \mu_H)}; \quad (5)$$

здесь μ_B, μ_H — коэффициенты динамической вязкости воды и нефтепродуктов, Па·с.

За время τ нижнюю часть цилиндра высотой h покинут все капли, которые будут крупнее размера

$$\delta_k = \sqrt{\frac{18 \mu_B k w_{всп}}{(\rho_B - \rho_H) g}}. \quad (6)$$

Таким образом, каждому значению скорости всплывания можно поставить в соответствие определенный размер капель и найти функцию распределения капель по размерам:

$$R(\delta_k) = \eta_\tau. \quad (7)$$

Функция плотности распределения дисперсных частиц по размерам:

$$f(\delta) = |dR(\delta)/d\delta|. \quad (8)$$

При определении распределения твердых частиц по скоростям осаждения использовали аналогичную методику и схожую установку, показанную на рис. 1, б, в которой пробы для измерения остаточной концентрации взвесей на момент времени τ отбирали из верхней части цилиндров с помощью сифона. В уравнении Стокса (4) коэффициент k для твердых частиц принимали равным единице.

Результаты и обсуждение

Дождевой сток с территории АТП исследовали при продолжительном дожде малой интенсивности (отбор проб был проведен через 2 ч после начала дождя, температура стока составляла 14 °С) и при кратковременном ливне (отбор проб через 20 мин после начала ливня, температура стока 19 °С). Средняя плотность нефтепродуктов — 870 кг/м³. Полученные распределения капель нефтепродуктов по скоростям всплывания и размерам приведены в табл. 1 и на рис. 2.

Таблица 1

Распределение капель нефтепродуктов по скоростям всплывания и размерам в дождевом стоке с территории АТП

№ цилиндра	Время расслоения сточной воды, мин	Скорость всплывания каплей нефтепродуктов $w_{всп}$, мм/мин	Средний размер частиц в i -й фракции δ_i , мкм	Функции $R(w_{всп})$, $R(\delta)$, %
Продолжительный дождь малой интенсивности (отбор проб через 2 ч после начала дождя, исходная концентрация нефтепродуктов 170 мг/л)				
1	600	0,5	10,8	98,5
2	544	1,1	16,1	96,5
3	272	2,1	22,2	94
4	136	4,2	31,4	90,4
5	48	6,2	38,2	87,9
6	24	12,5	54,2	83,7
7	12	25	76,7	69
8	6	50	108	45,2
9	3	100	153	22
10	1,5	200	217	3,0
Кратковременный ливень (отбор проб через 20 мин после начала ливня, исходная концентрация нефтепродуктов 480 мг/л)				
1	600	0,55	11,3	99,7
2	544	1,2	16,9	99,0
3	272	2,3	23,3	98,2
4	136	4,62	32,9	96,1
5	48	6,8	40,1	93,6
6	24	13,8	56,8	87,5
7	12	27,5	80,5	79,0
8	6	55	114	55,6
9	3	111	161	11,2
10	1,5	218	228	3,8

Экспериментально определенное распределение по скоростям осаждения и размерам твердых взвешенных частиц в дождевых стоках с территории АТП представлено в табл. 2 и на рис. 3. Средняя плотность твердых частиц в дождевом стоке составила 1290 кг/м³.

Талый сток с территории АТП исследовали в середине периода интенсивного снеготаяния. Пробы отбирали в полдень. Средняя температура стока составила 7 °С. Средняя плотность нефтепродуктов равнялась 780 кг/м³. Распределения капель нефтепродуктов по скоростям всплывания приведены в табл. 3; функции плотности распределения

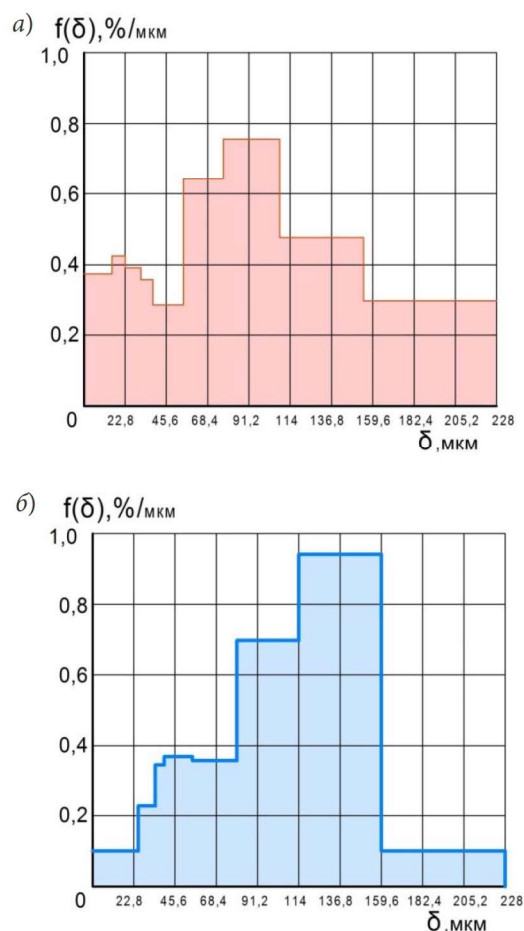


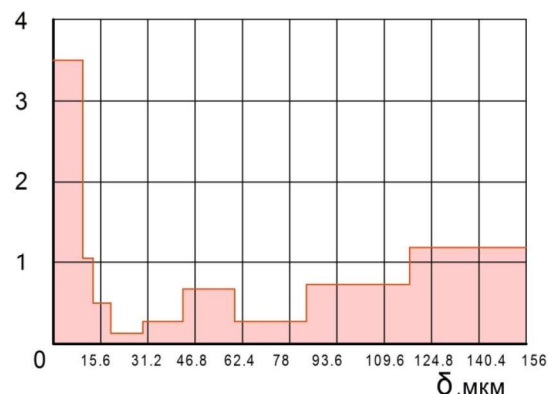
Рис. 2. Функции плотности распределения капель нефтепродуктов по размерам $f(\delta)$:
 а — продолжительный дождь малой интенсивности (исходная концентрация нефтепродуктов 170 мг/л);
 б — кратковременный ливень (исходная концентрация нефтепродуктов 480 мг/л)

Таблица 2

Распределение твердых включений по размерам и скоростям осаждения в дождевой сточной воде с территории АТП

№ цилиндра	Время осветления сточной воды, мин	Скорость осаждения твердых частиц w_{oc} , мм/мин	Средний размер частиц в i -й фракции δ_p , мкм	Функции $R(w_{oc})$, $R(\delta)$, %
Продолжительный дождь малой интенсивности (исходная концентрация твердых взвесей 570 мг/л)				
1	600	0,5	8,5	99,9
2	272	2,1	12,5	94,6
3	136	4,2	17,7	91,7
4	48	6,2	29,9	89,8
5	24	12,5	42,2	85,7
6	12	25	59,7	73,7
7	6	50	84,5	82,9
8	3	100	119	58,3
9	1,5	200	146	25
Кратковременный ливень (исходная концентрация твердых взвесей 480 мг/л)				
1	600	0,55	7,8	99,7
2	544	1,2	8,2	99,0
3	272	2,3	11,6	98,2
4	136	4,62	16,4	97,5
5	48	6,8	27,6	95,8
6	24	13,8	39,0	90,5
7	12	27,5	55,2	85,0
8	6	55	78,0	65,0
9	3	111	110	11,2
10	1,5	218	156	3,8

а) $f(\delta)$, %/мкм



б) $f(\delta)$, %/мкм

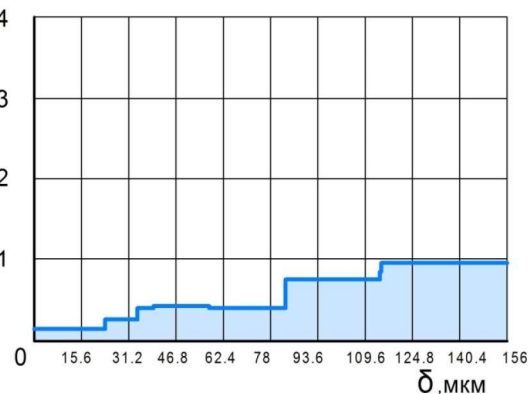


Рис. 3. Функция плотности распределения твердых частиц по размерам в дождевом стоке с территории АТП: а — продолжительный дождь малой интенсивности (исходная концентрация твердых взвесей 570 мг/л); б — кратковременный ливень (исходная концентрация твердых взвесей 480 мг/л)

по скоростям всплывания и размерам — на рис. 4.

Подобным же способом (отличие состояло лишь в том, что пробы отбирали из верхней части цилиндров с помощью сифона, а в уравнении Стокса (4) коэффициент k был равен единице) экспериментально определено распределение по размерам твердых взвешенных частиц в талых стоках с территории АТП (табл. 4, рис. 5). Средняя плотность взвешенных твердых частиц составила 1310 кг/м³.

Полученные распределения по размерам частиц и капель в реальной сточной воде с территории АТП согласуются с экс-

периментальными данными других авторов [9, 19, 20], они были использованы в качестве исходных данных при проведении нами численного эксперимента, результаты которого представлены в статье [2].

Итоги численного эксперимента совпали с экспериментальными данными с точностью ± 9 %. Эффективность очистки поверхностных сточных вод АТП от эмульгированных нефтепродуктов в коалесцентном сепараторе предложенной нами конструкции [1, 2] составила 98–99 %; эффективность очистки от взвешенных веществ достигала 93–98 %.

Таблица 3

Распределение капель нефтепродуктов по размерам в талом стоке с территории АТП

№ цилиндра	Время расслоения сточной воды, мин	Скорость всплывания капель нефтепродуктов $w_{всп}$, мм/мин	Средний размер частиц в i -й фракции δ_p , мкм	Функции $R(w_{всп})$, $R(\delta)$, %
Талый сток в середине периода интенсивного снеготаяния (исходная концентрация нефтепродуктов 960 мг/л)				
1	600	0,5	10,2	99
2	544	1,1	11,7	98,5
3	272	2,1	15,1	98
4	136	4,2	21,4	90,4
5	48	6,2	37,1	96,8
6	24	12,5	52,5	92
7	12	25	74,2	83
8	6	50	105	63
9	3	100	148	15
10	1,5	200	210	2,0

Таблица 4

Распределение твердых включений по размерам и скоростям осаждения в талой сточной воде с территории АТП

№ цилиндра	Время расслоения сточной воды, мин	Скорость осаждения твердых частиц $w_{ос}$, мм/мин	Средний размер частиц в i -й фракции δ_p , мкм	Функции $R(w_{ос})$, $R(\delta)$, %
Талый сток в середине периода интенсивного снеготаяния (исходная концентрация твердых частиц 2960 мг/л)				
1	600	0,42	7,7	99,5
2	544	0,46	8,1	99,0
3	272	0,92	11,4	98,1
4	136	1,84	16,1	97,9
5	48	5,52	27,8	97,5
6	24	11,0	39,4	95,3
7	12	22	55,7	85,4
8	6	44	78,7	52,3
9	3	88	111	10,2
10	1,5	176	157	3,1

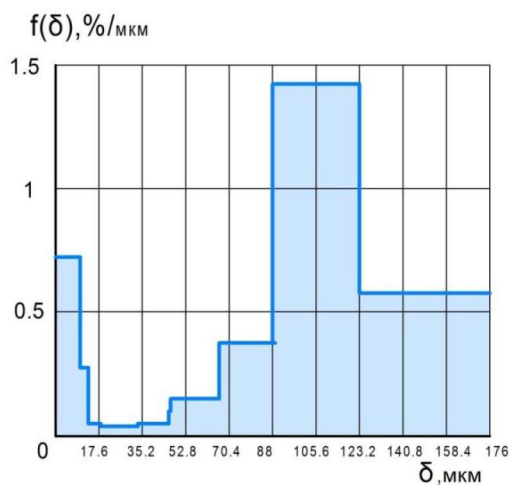


Рис. 4. Функция плотности распределения капель нефтепродуктов в талом стоке с территории АТП

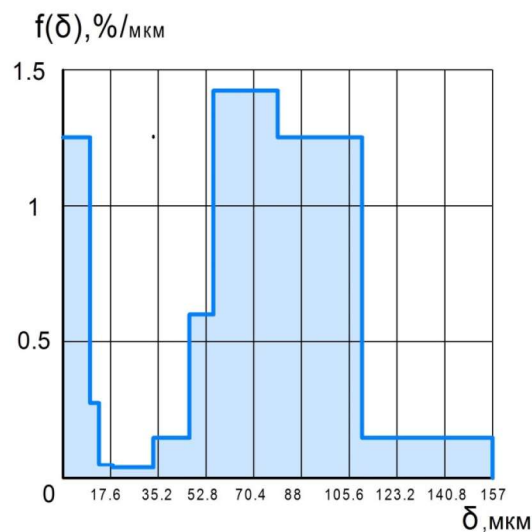


Рис. 5. Функция плотности распределения твердых частиц по размерам в талом стоке с территории АТП

Выводы

Исследован дисперсный состав поверхностных сточных вод, отводимых на очистку с территории автотранспортного предприятия. Средняя плотность нефтепродуктов в ливневых стоках составила 870 кг/м^3 , в талых стоках — 780 кг/м^3 . Показано, что в ливневых стоках преобладают капли нефтепродуктов

с размерами в диапазоне от 15 до 230 мкм, в талом стоке — от 11 до 180 мкм. Границей надежного улавливания капель нефтепродуктов в коалесцентных сепараторах является размер 10 мкм. По данным проведенных исследований лишь 1–2 масс. % капель в поверхностных сточных водах с территории

АТП имеют размеры менее этой величины. Это позволяет ожидать высоких значений степени очистки стоков от эмульгированных нефтепродуктов, что подтверждается проведенным численным экспериментом по предложенной нами ранее математической модели и нашими лабораторными исследованиями [2].

Средняя плотность твердых взвесей в ливневых стоках составила 1290 кг/м³, в талых стоках — 1310 кг/м³. Размеры твердых частиц и в дождевых, и в талых стоках находились в диапазоне от 7 до 156 мкм. Такие взвеси могут быть уловлены в сепараторе предложенной нами конструкции с эффективностью 93–98 %.

Библиографический список

1. Яблокова М. А., Зайцев Н. С., Хасаев Р. А. Совершенствование процессов и агрегатов для локальной очистки поверхностных стоков // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 7. С. 110–113.
2. Яблокова М. А., Иваненко А. Ю., Зайцев Н. С. Математическое моделирование коалесцентного сепаратора сооружений локальной очистки ливневых сточных вод // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 5. С. 91–98. DOI 10.23968/1999-5571-2022-19-5-91-98.
3. Palagin E. D., Gridneva M. A., Bykova P. G. Urban Land Surface Wastewater: Dependence of Formation and Changes in its Composition // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. P. 012093.
4. Palagin E. D., Strelkov A. K., Pavluhin A. A. Rain Precipitation Parameters for the Design of Surface Effluent Treatment Facilities from the Territory of Industrial Enterprises // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. «International Science and Technology Conference «Earth Science»». 2021. P. 012021.
5. Духопельникова Н. Р. Поверхностные сточные воды, система отведения и их очистка в крупных городах // Alfabuild. 2018. № 1 (3). С. 7–14.
6. Желтобрюхов В. Ф., Фельдштейн Е. Г. Проблемы очистки поверхностного стока // Вестник Волгоградского ГАСУ. Сер.: Строительство и архитектура. 2013. Вып. 30 (49). С. 206–211.
7. Юрченко В. А., Мельников О. Г., Бахарева А. Ю., Ячник М. В. Исследование механической очистки ливневых стоков, образованных на объектах автомобильно-дорожного комплекса // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. Т. 6, № 6 (78). С. 71–77. DOI 10.15587/1729-4061.2015.55427.
8. Желтобрюхов В. Ф., Фельдштейн Е. Г. О методах очистки поверхностных стоков автотранспортных предприятий // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4 (27). С. 1–7. URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/> (дата обращения: 22.02.2024).
9. Фельдштейн Е. Г. Совершенствование систем очистки поверхностного стока предприятий первой группы на примере автотранспортных предприятий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04. Волгоград, 2014. 24 с.
10. Феофанов Ю. А., Мишуков Б. Г. Особенности формирования состава поверхностных сточных вод и выбор сооружений по их очистке // Вода и экология. 2017. № 3 (71). С. 49–66. DOI 10.23968/2305-3488.2017.21.3.49-66.
11. Чечевичкин В. Н., Ватин Н. И. Особенности состава и очистки поверхностного стока крупных городов // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 6. С. 67–74.
12. Yayla S., Ibrahim S. S., Olcay A. B. Numerical investigation of coalescing plate system to understand the separation of water and oil in water treatment plant of petroleum industry // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2017. Vol. 11. № 1. Pp. 184–192.
13. Huang W., He X., Deng C., Xu B. Study on the intensification mechanism of oil-water separation process by using inclined plate pack // Advanced Engineering Sciences. 2017. Vol. 49. № 3. Pp. 191–196.
14. Boraey M. A. A hydro-kinematic approach for the design of compact corrugated plate interceptors for the de-oiling of produced water // Chemical Engineering and Processing. 2018. Vol. 130. Pp. 127–133.
15. Experimental and simulation study on separation performance of coalescing structural parts within oil-water gravity separator / L. Liang, Z. S. Bai, X. Y. Yang, H. Q. Luo, B. Zhang, W. N. Zhang // Xiandai Huagong. 2018. Vol. 38. № 11. Pp. 211–215.
16. Oruç M., Yayla S. Experimental investigation of oil-in water separation using corrugated plates and optimization of separation system // Separation Science and Technology. 2021. Vol. 56. Iss. 5. Pp. 788–800. DOI 10.37934/arfmts.92.1.162176.
17. Velautham K. D., Chelliapan S., Kamaruddin S. A., Meyers J. L. Design of oil water separator for the removal of hydrocarbon from stormwater contaminated with jet-fuel // Journal of advanced research in fluid mechanics and thermal sciences. 2022. Vol. 92. No. 1. Pp. 162–176.
18. Островский Г. М. Прикладная механика неоднородных сред. СПб.: Наука. 2000. 359 с.

19. Варюшина Г. П. Особенности сбора и очистки промышленно-дождевых сточных вод автотранспортных предприятий // Водоснабжение и санитарная техника. 2014. № 7. С. 43–48.

20. Палагин Е. Д., Гриднева М. А., Быкова П. Г., Набок Т. Ю. Исследование динамики состава поверхностного стока урбанизированных территорий // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 1. С. 51–56.

References

1. Yablokova M. A., Zaytsev N. S., Khasaev R. A. *Sovershenstvovanie protsessov i agregatov dlya lokal'noy ochistki poverkhnostnykh stokov* [Perfection of processes and aggregates for local treatment of surface runoff]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii – Modern knowledge-intensive technologies*, 2019, no. 7, pp. 110–113.

2. Yablokova M. A., Ivanenko A. Yu., Zaytsev N. S. *Matematicheskoe modelirovanie koalescentnogo separatora sooruzheniy lokal'noy ochistki livnevykh stochnykh vod* [Mathematical modeling of the coalescent separator of the local treatment of storm sewage]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2022, no. 5, pp. 91–98. DOI 10.23968/1999-5571-2022-19-5-91-98.

3. Palagin E. D., Gridneva M. A., Bykova P. G. Urban land surface wastewater: dependence of formation and changes in its composition. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, p. 012093.

4. Palagin E. D., Strelkov A. K., Pavluhin A. A. Rain precipitation parameters for the design of surface effluent treatment facilities from the territory of industrial enterprises. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser. «International Science and Technology Conference «Earth Science»*, 2021, p. 012021.

5. Dukhopel'nikova N. R. *Poverkhnostnye stochnye vody, sistema otvedeniya i ikh ochistka v krupnykh gorodakh* [Surface wastewater, the system of drainage and its treatment in large cities]. *Alfabuild.*, 2018, no. 1 (3), pp. 7–14.

6. Zheltobryukhov V. F., Fel'dshteyn E. G. *Problemy ochistki poverkhnostnogo stoka* [Problems of surface runoff treatment]. *Vestnik Volgogradskogo GASU. Ser. Stroitel'stvo i arkhitektura – Bulletin of Volgograd GASU. Ser. Construction and Architecture*, 2013, iss. 30 (49), pp. 206–211.

7. Yurchenko V. A., Mel'nikov O. G., Bakhareva A. Yu., Yachnik M. V. *Issledovanie mekhanicheskoy ochistki livnevykh stokov, obrazovannykh na ob'ektakh avtomobil'no-dorozhnogo kompleksa* [Investigation of mechanical cleaning of storm water runoff formed at the objects of automobile-road complex]. *Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy East European*

Journal of Advanced Technologies, 2015, vol. 6, no. 6 (78), pp. 71–77. DOI 10.15587/1729-4061.2015.55427.

8. Zheltobryukhov V. F., Fel'dshteyn E. G. *O metodakh ochistki poverkhnostnykh stokov avtotransportnykh predpriyatiy* [On methods of treatment of surface runoffs of motor transport enterprises]. *Inzhenerniy vestnik Dona – Engineering Bulletin of Don*, 2013, no. 4 (27), art. 127, pp. 1–7. Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/> (accessed: 22.02.2024).

9. Fel'dshteyn E. G. *Sovershenstvovanie sistem ochistki poverkhnostnogo stoka predpriyatiy pervoy gruppy na primere avtotransportnykh predpriyatiy. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Improving the surface runoff treatment systems of the first group enterprises on the example of motor transport enterprises. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Volgograd, 2014, 24 p.

10. Feofanov Yu. A., Mishukov B. G. *Osobennosti formirovaniya sostava poverkhnostnykh stochnykh vod i vybor sooruzheniy po ikh ochistke* [Features of the formation of the surface sewage composition and the choice of facilities for its treatment]. *Voda i ekologiya – Water and Ecology*, 2017, no. 3 (71), pp. 49–66. DOI 10.23968/2305-3488.2017.21.3.49-66.

11. Chechevichkin V. N., Vatin N. I. *Osobennosti sostava i ochistki poverkhnostnogo stoka krupnykh gorodov* [Features of composition and treatment of surface runoff of large cities]. *Inzhenerno-stroitel'niy zhurnal – Engineering and Construction Journal*, 2014, no. 6, pp. 67–74.

12. Yayla S., Ibrahim S. S., Olcay A. B. Numerical investigation of coalescing plate system to understand the separation of water and oil in water treatment plant of petroleum industry. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2017, vol. 11, no. 1, pp. 184–192.

13. Huang W., He X., Deng C., Xu B. Study on the intensification mechanism of oil-water separation process by using inclined plate pack. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, vol. 49, no. 3, pp. 191–196.

14. Boraey M. A. A hydro-kinematic approach for the design of compact corrugated plate interceptors for the de-oiling of produced water. *Chemical Engineering and Processing*, 2018, vol. 130, pp. 127–133.

15. Liang L., et al. Experimental and simulation study on separation performance of coalescing structural parts within oil-water gravity separator. *Xiandai Huagong*, 2018, vol. 38, no. 11, pp. 211–215.

16. Oruç M., Yayla S. Experimental investigation of oil-in water separation using corrugated plates and optimization of separation system. *Separation Science and Technology*, 2021, vol. 56, iss. 5, pp. 788–800. DOI 10.37934/arfmts.92.1.162176

17. Velautham K. D., Chelliapan S., Kamaruddin S. A., Meyers J. L. Design of oil water separator for the removal

of hydrocarbon from storm water contaminated with jet-fuel. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2022, vol. 92, no. 1, pp. 162–176.

18. Ostrovskiy G. M. *Prikladnaya mekhanika neodnorodnykh sred* [Applied mechanics of inhomogeneous media]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2000, 359 p.

19. Varyushina G. P. *Osobennosti sbora i oчитки promyshlennno-dozhdevykh stochnykh vod avtotransportnykh predpriyatiy* [Features of collection and purification of industrial rainwater waste water of

automobile transportation enterprises]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika – Water Supply and Sanitary Engineering*, 2014, no. 7, pp. 43–48.

20. Palagin E. D., Gridneva M. A., Bykova P. G., Nabok T. Yu. *Issledovanie dinamiki sostava poverkhnostnogo stoka urbanizirovannykh territoriy* [Investigation of the dynamics of surface runoff composition of urbanized territories]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika – Water Supply and Sanitary Engineering*, 2018, no. 1, pp. 51–56.