

УДК 574:629.12.06:628.33/35

UDC 574:629.12.06:628.33/35

**ЭКОЛОГИЯ АТМОСФЕРНЫХ СУДОВЫХ  
ВЫБРОСОВ****ATMOSPHERIC SHIP EMISSIONS ECOLOGY**

Исаков Александр Яковлевич  
д.т.н., профессор  
*Камчатский государственный технический уни-  
верситет, Россия*

Isakov Alexander Yakovlevich  
Dr. Sci.Tech., professor  
*Kamchatka State Technological University, Russia*

Показано, что морские транспортные средства являются источниками загрязнения атмосферы и подстилающей водной поверхности. Приводится анализ аэродинамических характеристик атмосферных судовых выбросов, содержащих в своём составе вредные вещества в газообразной, жидкой и твёрдой фазах. Концентрация экологически вредных примесей имеет распределение по направлению распространения струи и её поперечному сечению. Установлены зоны контакта струи с подстилающей морской поверхностью

It is shown, that shipping transportation facilities are the source of air pollution and underlying water surface. The analysis of aerodynamic characteristics of the aerial ship pollution containing hazardous substances in gas solid phases is given. Concentration of ecologically harmful impurities has distribution according to the direction of running stream spread and its cross section. Zones of running stream contact with underlying sea surface are made

Ключевые слова: АТМОСФЕРНЫЕ СУДОВЫЕ  
ВЫБРОСЫ, ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ,  
ПОДСТИЛАЮЩАЯ ВОДНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ,  
АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Keywords: ATMOSPHERIC SHIP EMISSIONS,  
ATMOSPHERE POLLUTION, SPREADING WA-  
TER TABLE, AERODYNAMIC CHARACTERIS-  
TICS

Известно [1], что в масштабах всей Земли 90% «избыточная» энергия в виде тепла и вредных выбросов поступает в окружающую среду от двигателей внутреннего сгорания, которые к настоящему времени являются основными силовыми элементами, посредством которых производят полезную работу, преобразуя энергетические возможности углеводородного топлива. Среди транспортных средств лидирующее положение в общем объёме вредных выбросов занимают автомобили (70%), сельскохозяйственные машины генерируют в окружающее пространство 9,2% выбросов, воздушный транспорт – 7,3%, морской транспорт – 4,1%. Применительно к площади водных пространств планеты техногенное воздействие флота, на первый взгляд, может показаться не существенным. Однако, по данным аналитических обзоров, в Мировой океан ежегодно сбрасывается более 10 млн. т вредных веществ, причём 6 млн. т приходится на нефтесодержащие вещества. Если учесть, что хозяйственная эксплуатация океанов сосредоточена в шельфовых зонах, то площади, на которых длительное время на-

ходятся морские транспортные средства, существенно сократятся, а количество вредных выбросов, приходящихся на единицу площади водной поверхности, – увеличится. Природоохранные и экологические организации отмечают в последние годы увеличение уровня загрязнения в биопродуктивных зонах океанов и морей, в частности это относится к самому биологически богатому Охотскому морю.

Подтверждением столь пессимистического взгляда на экологическую ситуацию могут служить данные баланса нефтепродуктов в Авачинской губе, полученные В. А. Березовской [2] в ходе многолетних постоянных наблюдений. По её данным, в течение года с судов в воды Авачинской губы поступает 2 560 т вредных выбросов, что составляет около 17 % от общего количества. Остаётся только усомниться в достоверности официальных статистических данных, потому что Авачинская губа по насыщенности флотом и уж тем более по площади водного зеркала не составляет 17 % от 26 000 единиц флота, приписанного к Камчатским портам и общей площади водной поверхности, находящейся в границах Российской Федерации.

Существенно отметить, что в пределах Авачинской губы несанкционированные сбросы с судов вод, содержащих нефтепродукты, носят спонтанный характер, потому что в общем балансе они составляют только 3,8 %, в то время как поступление углеводородов с водой прилива равно 62 490 т в год, что составляет около 93 % от общего количества нефти, поступающей в течение года в воды губы. Естественно предположить в этой связи, что за пределами Авачинской губы, в шельфовой зоне, где ведётся промысел и переработка сырья одновременно несколькими сотнями крупнотоннажных судов, экологическая обстановка не представляется вполне благополучной.

Кроме вредных сбросов в жидком состоянии для экологии окружающей среды представляют угрозу выбросы токсических веществ с отработанными газами.

Применительно к судовым дизелям принято считать, что около 98% отработанных газов, являющихся неотъемлемой частью их разомкнутого цикла, состоит из веществ в газообразном состоянии, включающим в свой состав окиси углерода, азота, серы и углеводородов. Кроме того, с отработанными газами в атмосферу выбрасываются вредные вещества в твёрдом и жидком состоянии. Твёрдая фаза представлена, в основном, продуктами неполного сгорания топлива в виде сажи. В состав жидкой фазы входят мелкодисперсные сферические частички смазочных веществ и не полностью окислившегося топлива.

Крупнотоннажные суда, снабжённые энергетическими установками мощностью  $N \geq 5 \cdot 10^6$  Вт ( $\geq 6800$  л.с.) выбрасывают в среднем в атмосферу около  $V_G \cong 0,45$  м<sup>3</sup>/с смеси отработанных газов и воздуха. Если принять среднегодовое количество суток, проведенных всеми добывающими судами в акватории Охотского моря  $\tau \cong 6600$  суток, а суммарные суточные выбросы отработанных газов в исследуемой акватории одновременно работающих  $Z = 80$  судов, составят  $V_{G(\tau)} \cong 3,1 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>, то в течение года объём выбросов отработанных газов составит  $V_{G(\Sigma)} \cong 1 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>.

Концентрация вредных веществ в отработанных газах зависит от многих факторов, основными из которых являются степень износа элементов топливной аппаратуры и цилиндропоршневой группы, а так же неудовлетворительное состояние возможных регулировок. Концентрация выбросов увеличивается также при использовании судовых дизелей на максимально возможных мощностных режимах, что часто случается во время промысловых рейсов при тралениях и выходах на замёт.

Судовые дизели в условиях промысла, с учётом морального и физического износа топливной аппаратуры имеют повышенные концентрации вредных веществ в отработанных газах. В табл. 1 приведены ориентировочные результаты расчетов, в основу которых положены приближенные

данные о концентрациях вредных газообразных и твёрдых веществ в отработанных газах судовых дизелей.

Оксидов углерода, например, в кубическом метре отработанных газов содержится в среднем  $1,5 \cdot 10^{-4}$  кг/м<sup>3</sup>, т.е. все суда за время пребывания в акватории Охотского моря в атмосферу выбрасывают по оптимистичным данным 384 кг. Такой же порядок выбросов и по другим составляющим продуктов сгорания в судовых энергетических установках.

Влияние газообразных вредных выбросов непосредственно на гидросферу, несомненно, имеет место быть, однако установить количественные параметры такого влияния чрезвычайно затруднительно ввиду сложности процессов при взаимодействии атмосферы и поверхности океана.

Таблица 1

Химический состав отработанных газов дизеля	Средняя концентрация вредных веществ в отработанных газах судовых дизелей	Объёмы выбросов вредных веществ рыбопромысловыми судами, м <sup>3</sup>		
		В течение суток одним усреднённым судном	Суточные выбросы по Охотскому морю 76 судами	Выбросы всеми судами в Охотском море за 6594 судосудок
Оксид углерода, СО, %	1	389	$2,94 \cdot 10^4$	$2,57 \cdot 10^6$
Оксиды азота в пересчёте на NO <sub>2</sub> , %	0,25	9,72	739	$4,87 \cdot 10^6$
Углеводороды в пересчёте на метан, %	0,001	0,4	29,5	$6,41 \cdot 10^4$
Альдегиды в пересчёте на С <sub>2</sub> Н <sub>4</sub> О, %	0,25	97,3	$7,39 \cdot 10^3$	$5,18 \cdot 10^5$
Формальдегиды, %	0,002	0,798	60,6	$5,26 \cdot 10^3$
Акролеин, %	$10^{-4}$	$3,89 \cdot 10^{-2}$	2,96	$2,57^4$
Бенз(α)пирен, мг/м <sup>3</sup>	0,075	29,2	$2,22 \cdot 10^3$	$1,46 \cdot 10^2$
Сажа г/м <sup>3</sup>	0,05	1,94 кг	148 кг	$1,28 \cdot 10^4$ кг

Непосредственное негативное влияние выбросов отработанных веществ в атмосферу достаточно убедительно прослеживается на примере сажи, которой по приведенным оценкам выбрасывается в общей сложности всеми судами почти 12 тонн. Сажа в некоторых случаях может сохра-

няться во взвешенном над водной поверхностью состоянии несколько часов. Сажистые выбросы принято различать по цвету: чёрные (сажистые), голубые (масляные), белые (топливные). Каждый цвет дыма соответствует превалированию той или иной неисправности топливной аппаратуры. Белый, голубой или коричневый дым состоит из капель несгоревшего топлива и масла. Для судовых дизелей наиболее характерен чёрный или тёмно серый цвет дыма, представляющего собой комплексы – агломераты мелкодисперсных относительно крупных твёрдых частиц, состоящих из полиароматических углеводородов с гексагональной структурой. Сажистые частицы являются продуктом крекинга, дегидрогенизации и полимеризации капель углеводородного топлива.

Сажа представляет собой вещество в аморфном состоянии со среднеарифметическими размерами частиц порядка  $d_s \cong 2 \cdot 10^{-7}$  м. Сама по себе сажа не токсична, но она обладает высокой степенью адсорбции. Сажа накапливает в своём составе газообразные и жидкие высокотоксичные компоненты, такие как бензо( $\alpha$ )пирен, формальдегиды, альдегиды и др.

Сажа судовых дизелей содержит полициклические ароматические углеводороды, относящиеся к канцерогенным веществам. Индикатором присутствия в отработанных газах всех известных групп канцерогенов является бензо( $\alpha$ )пирен. Таким образом, практически весь набор токсичных веществ транспортируется по прилегающей к судну акватории посредством сажистых частиц, которые, адсорбируя дополнительно на своей поверхности воду, оседают на поверхность, производя негативное воздействие на все элементы биосферы.

Рассмотрим упрощённый вариант атмосферных судовых выбросов в виде осесимметричной напорной конической струи, образованной источником постоянной интенсивности «нагруженным» на неподвижную среду, с физическими параметрами, незначительно отличающимися от выбросов. При данном упрощении единственным параметром, определяющим форму

струи является поток импульса (количества движения) и расстояние до источника. Пренебрегая эффектами вязкости, можно считать, что масштаб вихревого движения будет определяться только текущим радиусом конуса, занимаемого струей. Таким образом, ширину струи  $R$  (текущий радиус конуса, составляющего объём, занимаемый струей) и горизонтальную координату  $x$  можно связать следующим простым соотношением

$$x = k_1 R, \quad (1)$$

где  $k_1 \cong 4,75$  – коэффициент, установленный при моделировании струй в аэродинамических трубах и гидродинамических бассейнах [3]. Угол при вершине конуса, таким образом, определится как

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{R}{4,75R} \cong 11,9^\circ. \quad (2)$$

Поток кинетической энергии в струе пропорционален квадрату скорости и площади текущего сечения конуса, поэтому

$$\frac{m_0 v_0^2 \pi R_0^2}{2} = \frac{m_1 v_1^2 \pi R_1^2}{2}, \Rightarrow v_0^2 \frac{x_0^2}{k_1^2} = v_1^2 x_0^2 = v_1^2 x_2^2. \quad (3)$$

На основании уравнения (3) величину скорости в струе можно считать обратно пропорциональной удалению в направлении оси конуса

$$v \approx \frac{1}{x} \approx \frac{1}{k_1 R}. \quad (4)$$

Для определения режима движения продуктов выброса вычислим значение критерия Рейнольдса при скорости истечения газов  $v_s \cong 7$  м/с, скорости движения судна  $v_v \cong 3$  м/с и  $R = 10$  м

$$\operatorname{Re} = \frac{(v_s + v_v)R}{\nu} \cong 5,81 \cdot 10^4, \quad (5)$$

где  $\nu \cong 1,72 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с – коэффициент кинематической вязкости воздуха при нормальных условиях. Значение критерия Рейнольдса на расстоянии 10 м от источника соответствует турбулентному режиму движения продуктов выбросов. Если предположить постоянство критерия Рейнольдса

вдоль оси симметрии конуса, что не противоречит уравнению неразрывности, то скорость в струе можно выразить в виде следующей суммы

$$v = \langle v(r, x) \rangle + \tilde{v}(v, r, x, t), \quad (6)$$

где  $r$  – текущая радиальная координата,  $\tilde{v}$  – флуктуации скорости. Усреднённый по времени поток импульса с учётом уравнения (6) можно представить так

$$\left\langle \int_0^R \int_{\theta=0}^{2\pi} v^2 r d\theta dr \right\rangle = \left\langle 2\pi \int_0^R [\langle v \rangle^2 + \tilde{v}^2 + 2 \langle v \rangle \tilde{v}] dr \right\rangle = 2\pi \int_0^R [\langle v \rangle^2 + \tilde{v}^2] dr = \Phi_{\langle v \rangle} + \Phi_{\tilde{v}}, \quad (7)$$

где  $\theta$  – азимутальный угол в плоскости  $x = \text{const}$ ,  $\Phi_{\langle v \rangle}$  – поток импульса, характеризующий осреднённое движение в струе,  $\Phi_{\tilde{v}}$  – поток импульса пульсационного движения. При увеличении времени осреднения можно прийти к независимости от азимутального угла средней величины скорости, т.к. при этом  $\langle \tilde{v} \rangle \rightarrow 0$ . Постоянство скорости инжекции струи в плоскости перпендикулярной направлению истечения при характерном размере сопла  $a$ , будет сохраняться до расстояния  $x_0 \cong 5a$ , далее, по мере распространения продуктов выбросов эпюра распределения скоростей по сечению будет принимать колоколообразный вид [3], качественная картина которого приведена на рис. 1

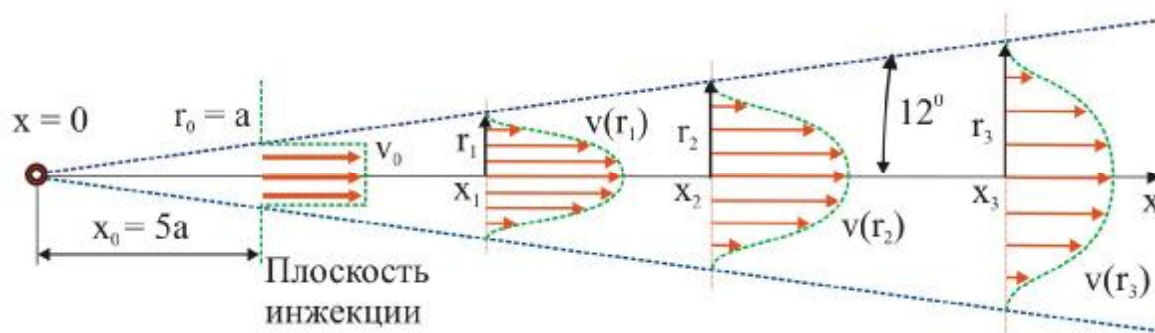


Рис. 1. Распределение скоростей в различных сечениях струи судовых выбросов

Развитие струи в пространстве протекает при воздействии теплофизических эффектов, в частности, на начальных этапах формирования будет наблюдаться проявление архимедовых сил, струя будет «всплывать».

На рис. 2 приведена схема формирования струи за движущимся судном, точка  $O$  соответствует положению виртуального источника выбросов в виде правильного конуса с углом  $\alpha$  при вершине.

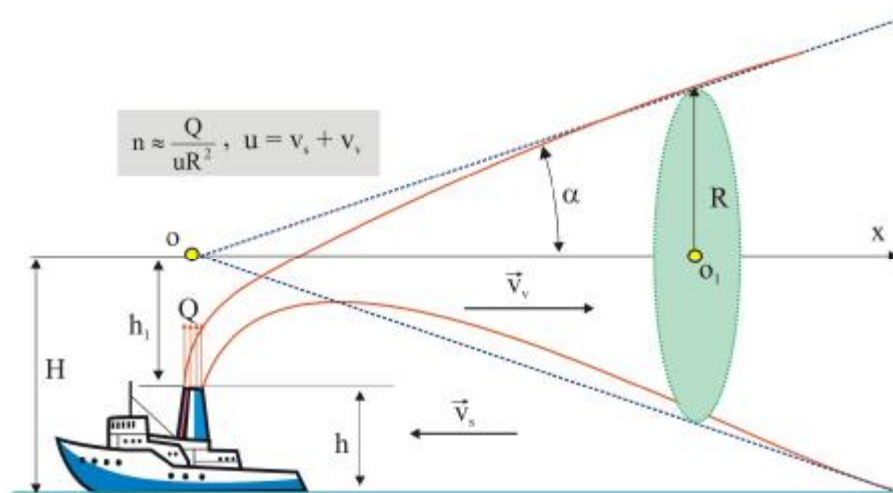


Рис. 2. Распространение за судном всплывающей струи

Концентрация вредных выбросов в струе  $n$ , исходя из постоянства величины потока импульса по направлению распространения, определится как

$$vnR^2 = \text{const}, \quad n \approx \frac{Q}{uR^2}, \quad (8)$$

где  $Q$  – интенсивность источника,  $u$  – геометрическая сумма скоростей ветра и судна, которая по своей величине в области конуса превосходит скорость движения продуктов выброса. Необходимо отметить, что распределение концентрации выбросов будет находиться в зависимости от распределения скоростей, как по направлению движения судна, так и в плоскости поперечного сечения струи. Для определения максимальной скорости в начальном сечении струи воспользуемся уравнением Л.Г. Лойцянского [4]

$$v_{\max} = \frac{3}{8\pi\zeta} \sqrt{\frac{J_0}{\rho}} \cdot \frac{1}{x} \left( 1 - \frac{1}{16\sqrt{\pi\zeta}} \cdot \frac{R}{2x} \right), \quad (9)$$

где  $\zeta \cong \sin\alpha \cong 0,21$  – константа для данной формы струи,  $J_0$  – величина импульса струи в начальном сечении при  $x = 0$



$$J_0 = \pi R^2 \rho v_0^2. \tag{10}$$

Совмещая уравнения (9) и (10), получим

$$v_{\max} = \frac{3\sqrt{\pi} R v_0}{8\pi \zeta} \cdot \frac{1}{x} \left( 1 - \frac{R}{32x\zeta\sqrt{\pi}} \right) \cong \frac{0,132 R v_0}{x} \left( 1 - \frac{R}{12x} \right) \cdot \frac{1}{x}. \tag{11}$$

Комбинация величин, стоящих перед скобкой может рассматриваться как максимальное значение скорости в начальном сечении струи. В этом случае  $R = x$ ,  $\text{tg}\alpha = 0,21x$ , следовательно:

$$\frac{v_{\max}}{v_{\max(0)}} = \left( 1 - \frac{R}{12x} \right) \frac{1}{x} \cong \frac{1}{x} \left( 1 - \frac{0,21x}{12x} \right) \cong \frac{0,982}{x}, \tag{12}$$

или

$$v_{\max} \cong \frac{0,982 v_{\max(0)}}{x}. \tag{13}$$

Как и следовало ожидать, скорость микрообъемов выбросов в струе, вызванная начальным импульсом  $J_0$  обратно пропорциональна расстоянию от физического источника до точки наблюдения, если струя выбросов истекает с начальной скоростью 10 м/с, то на расстоянии  $x \cong 100$  м, эта скорость составит всего 0,1 м/с. Возвращаясь к уравнению (8), отметим, что концентрация вредных веществ пропорциональна величине осреднённой скорости и обратно пропорциональна радиусу струи

$$n \approx u, \quad n \approx \frac{1}{R}, \quad n \approx \frac{1}{x}. \tag{14}$$

Поток вредных выбросов по аналогии с уравнением (7) можно представить следующим соотношением

$$\Phi_n + \tilde{\Phi}_n = 2\pi \int_0^R \langle vn \rangle dr + 2\pi \int_0^R \langle \tilde{v}\tilde{n} \rangle dr. \tag{15}$$

Флуктуационная составляющая скорости в меньшей степени способна изменять концентрацию в масштабах объёма струи, способствуя, в основном, её выравниванию по площади поперечного сечения. Это даёт основания первое слагаемое уравнения (15), используя зависимости для концентрации (8) и (14), представить следующим образом

$$n \approx \frac{Q}{v(x \operatorname{tg} \alpha)^2} \approx \frac{Q}{0,452 u x^2}. \quad (16)$$

Максимальная величина концентрации выбросов с использованием обозначений рис. 2 может быть определена так:

$$n_{\max} = k_2 \frac{Q}{u(h + h_1)^2}. \quad (17)$$

Картина распределения концентраций в направлении распространения струи может быть получена посредством уравнения (17) методом двух виртуальных источников  $J_1$  и  $J_2$  [3], который позволяет установить местоположение точки А, в которой шлейф соприкасается с подстилающей морской поверхностью.

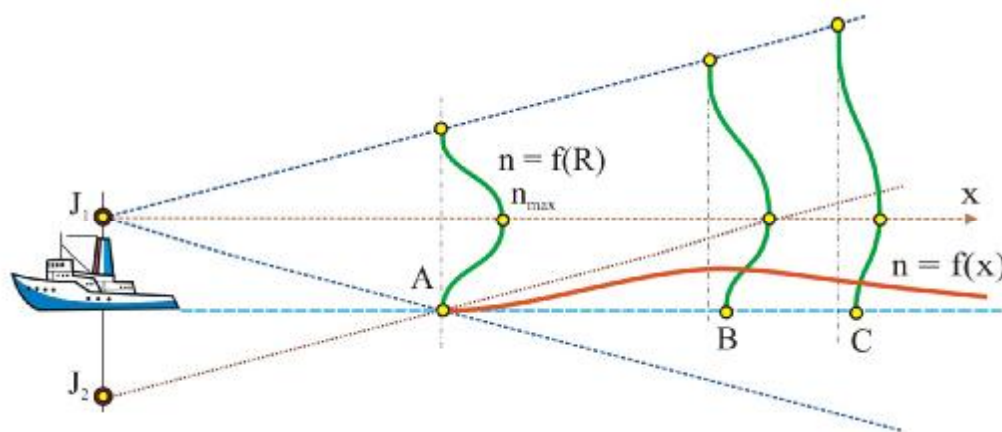


Рис. 3. Распределение выбросов на подстилающей морской поверхности

Плоскость перпендикулярная направлению распространения струи, содержащая точку А, соответствует максимуму концентрации выбросов, определяемому уравнением (17). Коэффициент  $k_2$  определяется углом при вершине конуса, для  $\alpha = 12^\circ$ ,  $k_2 \cong 0,15$ . Поток загрязняющих примесей через последующие сечения струи можно найти из следующих соображений.

На уровне подстилающей поверхности максимальная величина концентрации будет равна в первом приближении средней величине по поперечному сечению с площадью, составляющей  $2/3$  площади окружности радиусом  $r = 1,5 (h + h_1)$

$$Q_i = \frac{2}{3} \pi u_{\max} \left[ \frac{9(h+h_1)^2}{4} \right]. \quad (18)$$

Из уравнения (18) следует, что через точку А будет проходить изолиния, ограничивающая попадание вредных выбросов на подстилающую морскую поверхность. Вне пределов этой изолинии при постоянной силе ветра и неизменности курса судна  $n = 0$ . В точке В имеет место максимум концентрации вредных выбросов на подстилающей поверхности в твёрдом и жидком состоянии, прежде всего сажи, конденсата и микрочастиц, состоящих из несгоревшего топлива. На рис. 4 приведены изолинии концентраций вредных примесей на подстилающей поверхности.

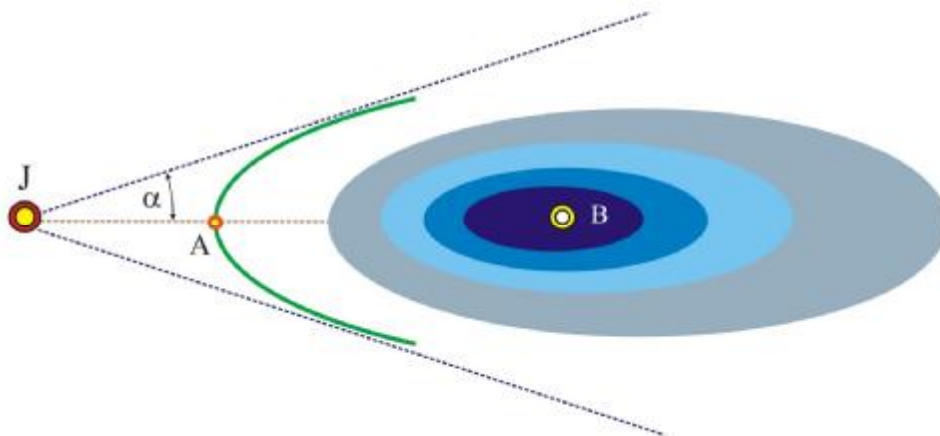


Рис. 4. Площади равнозначных концентраций выбросов

При движении судна с постоянной скоростью за его кормой будет наблюдаться эллиптическая область, внутри которой на водную поверхность будут осаждаться вредные вещества в жидкой и твёрдой фазе. Твёрдые осадки представляют собой сажу, являющуюся, по сути, продуктами неполного сгорания топлива: агломераты мелкодисперсных твёрдых частиц, состоящих из полиароматических углеводородов с гексагональной структурой. Сажистые частицы являются продуктом крекинга, дегидрогенизации и полимеризации капель, распыленным в камеры сгорания углеводородного топлива. Кроме сажи на подстилающую поверхность будут осаждаться капли, возникающие в шлейфе при понижении температуры в ре-

зультате смешения с атмосферным воздухом до критических величин. Твёрдые частички могут, наряду с жидкими кластерами, являться ядрами конкурентной фазы. В этом случае картина осаждения вредных выбросов на подстилающую поверхность будет отличаться от описанной выше. Изолинии на рисунке 4 в этом случае сместятся ближе к источнику, эллиптические области будут иметь меньшие площади. Другими словами области загрязнения поверхности уменьшатся, а концентрация вредных веществ возрастёт.

### Литература

1. Салова Т.Ю., Громова Н.Ю., Шкрабак В.С., Кушмарёв Г.А. Основы экологии. Аудит и экспертиза техники и технологии: Учебник для вузов. – СПб. Лань, 2004. – 336 с.
2. Березовская В.А. Авачинская губа. Гидрохимический режим, антропогенное воздействие. – Петропавловск-Камч.: КГАРФ, 1999. – 157 с.
3. Скорер Р. Аэрогидродинамика окружающей среды. Пер. с англ. В.А., Л.К. Эрдмана. Под ред. А.Я. Прессмана. – М.: Мир, 1980. – 549 с.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 847 с.