

В.С. Комаров, Г.И. Мазуров, В.П. Белогуб

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАЗВИТИЯ АНТРОПОГЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ ОБЛАКОВ И ТУМАНОВ НАД МОРЕМ*Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск
Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург*

Поступила в редакцию 31.06.98 г.

Принята к печати 30.10.98 г.

Приводятся результаты численных, лабораторных и натуральных экспериментов по созданию и развитию искусственных облачных образований за морскими судами. Показано, что условия их развития идентичны с условиями возникновения облачных образований антропогенного происхождения. Эти условия можно изменять и в некоторой степени уменьшать вероятность возникновения антропогенных облачных образований или стимулировать создание искусственных за счет использования аэродинамического спутного следа корабля и некоторых реагентов.

Все усиливающееся антропогенное воздействие (бытовая и хозяйственная деятельность человека) на окружающую среду, и в том числе на атмосферу, привело к тому, что в настоящее время можно выделить не менее 8 разновидностей облачных образований именно антропогенного происхождения (АОО). Это облачные следы, возникающие за самолетами [1], вертолетами [2], морскими судами [3, 4]; аэродромные (печные) туманы [1]; смоги (фотохимические туманы) [5]; облачные шлейфы за трубами промышленных предприятий [5] и от крупных пожаров, особенно лесных [6]; облачные образования вблизи градирен ТЭЦ и АЭС [5]. Некоторые пространственно-временные характеристики (ПВХ) антропогенных облаков и туманов и условия их возникновения представлены в табл. 1.

Анализ данной таблицы показывает, что условия возникновения антропогенных облаков и туманов достаточно разнообразны по температуре воздуха (от -28°C для самолетных облачных следов до $+32^{\circ}\text{C}$ для следов за морскими судами и смогов), а по влажности более однородны, поскольку возникают в основном при повышенных ее значениях, за исключением смогов.

Изучив условия развития АОО, можно изменить вероятность их возникновения. Стимуляция их развития может оказаться полезной для сглаживания экстремальных температур.

Исходя из условий развития АОО, можно изменить вероятность их возникновения. Стимуляция их развития может оказаться полезной для сглаживания экстремальных температур.

Т а б л и ц а 1

Некоторые характеристики антропогенных облаков и туманов

№ п/п	Вид образования	Температурный режим	Относительная влажность, %	Скорость ветра, м/с	Время суток	Геометрические размеры
1	За самолетами (облачные следы)	$< -28^{\circ}\text{C}$ $< -36^{\circ}\text{C}$ $< -39^{\circ}\text{C}$	100 60 0	любая	круглые сутки	тысячи км в длину и до 1 км в ширину
2	За вертолетами (облачные следы)	$< -15^{\circ}\text{C}$	> 85	0...3	«	по площади до 1000 км ²
3	За морскими судами (облачные следы)	$< +32^{\circ}\text{C}$, включая и отрицательные	> 70	0...5	«	до 1000 км в длину и до 50 км в ширину
4	Аэродромные (печные) туманы	$< -30^{\circ}\text{C}$	> 60	0...3	«	по площади до 1000 км ²
5	Смоги (фотохимические туманы): а) Лос-Анжелес б) Лондон	24...32 °C -1...4 °C	60...70 80...100	штиль 0...3	полдень ночь, утро	« «
6	Облачные шлейфы за трубами промышленных предприятий	при любых, интенсивнее при отрицательных	< 100	любая	круглые сутки	в длину 100–200 км
7	Облачные шлейфы от крупных пожаров, особенно лесных	при любых	«	«	«	в длину до 5600 км, в ширину до 400 км
8	Облачные образования от испарительных установок	способствуют отрицательные	70...100	0...5	«	«

Примечание. Во всех случаях антропогенные образования развиваются под задерживающим слоем в виде инверсии или изотермии.

По данным [7], искусственно созданная перисто-слоистая и высокослоистая облачности могут изменять температуру приземного воздуха в течение полусуток на 5° .

Кроме того, все перечисленные АОО ухудшают экологическую обстановку (например, задымляя территорию) [5] и затрудняют наблюдения земной поверхности из космоса [8]. Это обусловлено тем, что днем появление подобной облачности вызывает понижение температуры приземного воздуха, а ночью, напротив, препятствует его выхолаживанию.

Следует подчеркнуть, что физико-метеорологические условия развития облачных следов за самолетами и вертолетами детально описаны в [1, 2]. В то же время условия развития облачных следов за морскими судами описаны в метеорологической литературе заметно слабее (можно указать лишь работу [3]). Кроме того, для первых двух типов облачных следов выработаны рекомендации по уменьшению вероятности их возникновения, а для облачных следов за самолетами даже разработан способ искусственной интенсификации их появления [9]. Ничего подобного не разработано для облачных следов, возникающих за морскими судами (МС).

Учитывая это обстоятельство, в настоящей статье и рассматриваются подробно условия возникновения и искусственного создания облачных следов за МС.

Остановимся вначале на рассмотрении общих физико-метеорологических условий возникновения облачных образований неконвективных форм. К ним относятся следующие условия:

- 1) наличие задерживающего слоя (см. примечание к табл. 1);
- 2) понижение температуры воздуха со временем;
- 3) в основном небольшие скорости ветра, вплоть до штиля;
- 4) повышенная влажность воздуха, часто близкая к 100% (см. табл. 1);
- 5) наличие ядер конденсации;
- 6) эффект смешения воздушных масс;
- 7) вертикальные движения, характерные для данной разновидности образований.

Анализируя эти условия, следует сказать, что первые три из них искусственно создать нельзя, а можно только разрушить задерживающий слой, например, с помощью метеотрона [10] и этим предотвратить возникновение антропогенного образования за счет выброса примесей в вышележащие слои. Создание последних четырех условий технически осуществимо.

Роль первых шести условий общеизвестна. Так, встречаются слои инверсии без облачности с ухудшенной видимостью, но нет случаев появления неконвективной облачности или тумана без задерживающего слоя. Именно под этими слоями скапливаются влага и различные атмосферные примеси, выступающие как ядра конденсации. Такому скоплению способствуют штиль или слабый ветер. В результате начинается конденсация, или сублимация, водяного пара. Она усиливается и при смешении воздушных масс.

Радиационное выхолаживание приземного слоя воздуха, особенно ночью, часто приводит к возникновению туманов и слоистообразных облаков. Однако понизить искусственно температуру воздуха в каком-либо районе до точки росы можно только теоретически. Практически это будет очень дорогая операция, которая приведет к конденсации влаги на холодильных элементах и к осушению воздуха.

Роль гидроскопических ядер конденсации хорошо известна [1], и их можно вносить искусственно (как и дополнительное увлажнение) вместе с выхлопными газами двигателей [9].

Особенно подробно следует остановиться на 7-м условии. Это – наличие восходящих потоков или определенной циркуляции в облаке. Действительно, известно [11], что каждому виду облаков присущи определенные вертикальные движения. Они и обеспечивают существование облака как единого целого. Это подтверждают фотоснимки из космоса [4], на которых зафиксирована искусственная облачность, образовавшаяся за кораблями в их аэродинамическом спутном следе. Это облачность оказывается в определенных условиях достаточно устойчивой и имеет большую горизонтальную протяженность (см. табл. 1).

Таким образом, искусственно наведенная циркуляция может быть создана и в спутном аэродинамическом следе. Это позволяет стимулировать создание искусственных облачных образований (ИОО) неконвективных форм и увеличить значения их ПВХ.

Перейдем непосредственно к рассмотрению результатов наших исследований по затрагиваемой проблеме. Причем вначале остановимся на некоторых результатах численного гидро- и аэродинамического моделирования модели корабля, необходимого для установления характеристик спутного аэродинамического следа и повышения эффективности создания искусственных облачных образований над морем. При этом в процессе моделирования особое внимание обращалось на роль 7-го условия развития облаков, а именно на создание искусственно наведенной циркуляции по замкнутому контуру.

Важно отметить, что если в [10] в основном исследуются изменения термогидрометрических характеристик горизонтальных струй вообще и аэродинамического спутного следа в частности, то нами основное внимание обращено на исследование пространственно-временных характеристик интенсивности последнего.

При численном моделировании рассматривалась плоская модель и расчеты выполнялись на основе метода дискретных вихрей [12]. Основные результаты представлены на рис. 1. Из него видно, что аэродинамический след в поперечнике имеет эллипсоидную форму и расширяется при удалении от кормы. При этом угол подъема $\alpha = 7^\circ$, а угол расширения следа по горизонтали $\gamma = 11^\circ$.

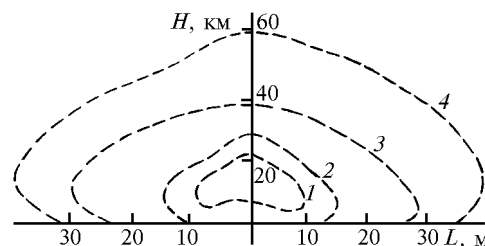


Рис. 1. Форма и размеры зон активного турбулентного перемешивания (аэродинамического спутного следа), перпендикулярных продольной оси корабля, полученных при численном моделировании плоской модели корабля на расстояниях от его носовой части: 1 – 65; 2 – 140; 3 – 260; 4 – 455 м

В аэродинамической трубе обдувалась объемная модель корабля под углами $\beta = 0, 30, 90$ и 180° . В гидротомке исследовалась также объемная модель. В первом случае с помощью метода парового экрана [12] лучше прослеживалась вихревая структура аэродинамического следа, а во втором –

ось вихря, выявляемая подкрашенной струйкой. Это позволило определить режим работы форсунок и оптимальные точки их установки для ввода реагента.

Угол подъема вихревого следа при аэродинамическом обдуве $\alpha = 11^\circ$, а угол расширения следа $\gamma = 58^\circ$. Это больше, чем при численном моделировании плоской модели, что можно объяснить влиянием симметрично расположенных палубных надстроек. В табл. 2 представлены некоторые характеристики вихревых зон по данным трубного и натурного экспериментов, проведенных для пяти сечений*.

Анализ данных табл. 2 показывает удовлетворительное совпадение рассчитанных и реальных характеристик, поскольку их порядок одинаков, а значения в натурных экспериментах, как правило, всего на 15–30% больше, чем при трубном. Исключением является высота вихревой зоны в сечении V (на корме) при обдуве модели под углом $\beta = 30^\circ$, где различие составляет 100%.

Очень точно совпали картины обтекания модели в трубном эксперименте и корабля при натуральных. Так, в обоих случаях воздушный вихрь с подветренного борта сваливается на поверхность раздела (воду) и не разбивается. Это говорит о том, что форсунки на этом борту следует отключить для экономии реагента. В целом, естественно, картина вихревых потоков в трубном эксперименте более идеализирована, чем в натурном. Однако стоимость последнего на 2–3 порядка выше.

Условия развития облачных полос за МС сравнивались с условиями развития аналогичных полос за небольшими (диаметр менее 50 км) островами [13] (в данном случае речь идет об орографических облаках). Они оказались очень схожими. Исключение составляет вклад продуктов сжигаемого топлива в судовых энергетических установках МС, которых нет над островами. Однако расчеты, проведенные для шести типов судов, показали, что такой вклад в образование облачных полос может быть существенным только при влажности 98% и положительной температуре или при влажности 95% и отрицательной температуре [3].

Кроме такого достаточно прямолинейного расчета дополнительного увлажнения аэродинамического следа МС за счет сжигания топлива была оценена роль изобарического смещения выхлопных газов и окружающего воздуха в образовании облачных следов за МС. Известно, что при таком смещении могут происходить два противоположно направленных процесса: увлажнение, приближающее смесь к состоянию насыщения, и ее нагревание, удаляющее ее от этого состояния. Определялись граничные условия этих процессов. Согласно [14] влажность смеси газов можно определить по формулам

$$s(T) = \frac{(ls_1 - s_2)(T - T_2) + s_2(T_1 - T_2)}{(l - 1)(T - T_2) + (T_1 - T_2)}, \quad (1)$$

$$e(T) = \frac{(le_1 - e_2)(T - T_2) + e_2(T_1 - T_2)}{(l - 1)(T - T_2) + (T_1 - T_2)}, \quad (2)$$

где $l = c_{p2}/c_{p1}$ – отношение теплоемкостей; e – парциальное давление водяного пара; s – его массовая доля. Температура и характеристики влажности со значками 1 и 2 относятся к смешиваемым массам, а без них – к смеси.

При $l = 1$ формулы (1) и (2) упрощаются и принимают вид

$$s(T) = \frac{\Delta s}{\Delta T}(T - T_2) + s_2 \text{ и } e(T) = \frac{\Delta e}{\Delta T}(T - T_2) + e_2. \quad (3)$$

Эти соотношения позволяют по известным начальным значениям характеристик смешивающихся газов определить влажность при любой температуре смеси газов T , варьирующей в пределах от T_1 до T_2 . При этом относительная влажность f описывается выражением $f = e(T)/E(T)$, где $E(T)$ – давление насыщенного водяного пара.

Если $\Delta e/\Delta T \geq \Delta E/\Delta T$, то следы образуются. Здесь величина левой части зависит от содержания водорода в топливе. Граница образования облачных следов представляет собой касательные к кривой зависимости давления насыщения от температуры [1]. Эти касательные и все секущие характеризуют процессы, при которых образуются облачные следы, а ниже касательной следы не образуются. Более высокая температура образования облачных следов за МС по сравнению со следами за самолетами и вертолетами [1, 2] объясняется тем, что на срезе турбореактивного двигателя (ТРД) температура газов превышает 1000°C , а на срезе выхлопной трубы МС она на порядок ниже. Поэтому для ТРД $\Delta s/\Delta T = 0,0336 \cdot 10^{-3} (\text{C}^{-1})^{-1}$, а для МС это соотношение на порядок больше (см. кривую 2 на рис. 2). Кривая 2 построена при давлении $p = 1000$ гПа, а при меньших значениях давления воздуха аналогичные кривые будут располагаться выше нее – до кривой 1, характеризующей зависимость $\Delta E/\Delta T$ от температуры и влажности воздуха.

Из анализа рис. 2 следует, что образование облачных следов за МС может наблюдаться и при температуре $T > 28^\circ$ (тем более в связи с планируемым переходом на топливо с большим содержанием водорода [15]). Впрыскивая воду в выхлопные газы или увеличивая каким-либо образом в них содержание водорода, который может окислиться, можно создавать искусственные облачные полосы за МС. Наоборот, охлаждая и осушая выхлопные газы, можно уменьшить вероятность образования таких полос антропогенного происхождения.

Таблица 2

Некоторые характеристики вихревых зон по данным трубного (тр.) и натурного (нат.) экспериментов при обтекании под углом $\beta = 0$ и 30°

Сечение	$\beta = 0^\circ$				$\beta = 30^\circ$			
	Высота вихревой зоны в эксперименте, м		Радиус вихря в эксперименте, м		Высота вихревой зоны в эксперименте, м		Радиус вихря в эксперименте, м	
	тр.	нат.	тр.	нат.	тр.	нат.	тр.	нат.
I	5,6	–	1,3	–	6	–	1,4	–
II	8,4	–	2,25	2,4	10	13	3	4,5
III	15,5	17	–	2,8	14,5	18	–	–
IV	17	–	–	–	14	20	–	–
V	16	–	–	–	14	28	–	–

* При этом сечение I располагается на расстоянии 5 м от носа корабля, II – IV находятся на расстоянии, равном одной, двум и трем четвертям длины корабля от носа соответственно, и V совпадает с кормой корабля.

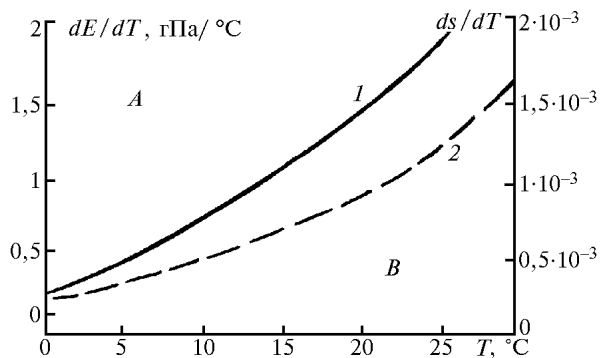


Рис. 2. Зависимость образования облачных следов за МС при изобарическом смешении выхлопных газов и воздуха от температуры и влажности последнего и свойств топлива. Область *A* – полосы возникают, *B* – не образуются; 1 – зависимость dE/dT и 2 – зависимость ds/dT от температуры

С учетом описанных выше теоретических разработок были проведены натурные судовые эксперименты по созданию искусственных облачных образований над Балтийским и Черным морями в летний период. Гидрометеорологическое обеспечение осуществляла экспедиционная группа из 15 человек, возглавляемая Г.И. Мазуровым. При этом использовалась стандартная метеорологическая и аэрологическая информация, включающая дневники и карты погоды (приземные и высотные), результаты радиозондирования атмосферы, карты нефанализа и фотоснимки облачности из космоса. Выполнялись также фото-, видео- и кинорегистрация результатов экспериментов и схематизация их проведения.

Все эксперименты проводились в утренние и дневные часы, когда создаваемые ИОО прослеживались визуально и фотографировались как наблюдателями с берега и кораблей, так и с летательных аппаратов. Выпуск реагента выполнялся с носовой части корабля или при расположении форсунок по всей длине борта. Корабль перемещался с различной ориентацией по отношению к ветру, скорость изменялась от 0 (дрейф) до 50 км/ч. Все способы выпуска реагента с учетом места расположения форсунок на корабле и взаимоотношений векторов его движения и ветра были сведены к шести типам. Наиболее перспективными в смысле устойчивости ИОО оказались способы, когда корабль-постановщик перемещался строго против ветра, выпуская реагент соответственно с кормы или носовой части.

Кроме результатов стандартных метеонаблюдений использовались данные градиентных измерений до высоты 8–12 м на корабле-измерителе, а также данные привязного радиозонда до высоты 90 м. Над сушей подобная информация была до высоты 300 м с дискретностью через 10 м. Осуществлялась привязка полученных данных к информации ближайшего стандартного радиозонда, выпускаемого через 6 ч. Кроме того, были использованы гидрологические измерения температуры воды до глубины 40 м, а также высотные карты АТ-925 и АТ-850.

Поскольку на создание ИОО основное влияние оказывало состояние приводного слоя, то на его анализе и было сосредоточено особое внимание. Влияние вектора ветра на устойчивость создаваемого ИОО проверялось путем постановки его при движении корабля-постановщика со скоростью 50 км/ч по окружности радиусом 1000 м. Результаты этого эксперимента были сфотографированы с самолета АН-26 с высоты 300 м. Они подтвердили вывод о том, что боковой ветер уменьшает устойчивость созданного образования,

а строго встречный – увеличивает за счет большей скорости обтекания корабля воздухом и возникновения более интенсивного следа. Созданная в нем циркуляция по замкнутому контуру противостоит естественной атмосферной. В итоге возникшее образование перемещается по ведущему потоку как единое целое.

Результаты одного из экспериментов были засняты на экране радиолокатора (табл. 3), а другого – со спутника «Метеор-30». Судя по эволюции засветки от облака на экране РЛС, оно смещалось к востоку по ведущему потоку со скоростью 5 м/с и его площадь составляла 60000 м² через 1 мин, увеличившись через 15 мин до 800000 м².

Таблица 3

Изменение горизонтальных размеров созданного облака в одном из экспериментов на экране радиолокатора через 1, 10 и 15 мин на различных удалениях

Время, мин	1	10	15
Удаление, м	300	3000	5400
Горизонтальные размеры, м	200 × 300	400 × 1800	800 × 1000
Площадь, м ²	60000	720000	800000

Созданное облако удалось зафиксировать со спутника только один раз, когда он пролетал через 1 ч 55 мин после пуска реагента. За это время облако под влиянием северо-восточного ветра сместилось к юго-западу от Севастополя на расстояние 30 км, что при скорости ветра 4 м/с вполне реально. На этом удалении оно прослеживалось на фотоснимке со спутника и имело размер 50×10 км. Оно располагалось, по данным летающего там самолета АН-26, на высоте 200 м под слоем инверсии, который прослеживался на аэрологической диаграмме, построенной по данным радиозондирования за 09 ч.

В целом во время экспериментов над морями температура воздуха изменялась от 12°C над Балтийским до 25°C над Черным, а температура воды соответственно от 13 до 24°C. Влажность колебалась от 100 до 54%, причем более высокая влажность отмечалась над Балтикой, а низкая – над Черным морем. Аналогичный характер имеет и волнение воды: в первом случае оно было равно 2–3, а во втором – 1–2 баллам, хотя были дни и со спокойным морем. При этом подобный характер волнения воды определялся скоростью ветра. Так, над Балтикой скорость ветра колебалась от 2 до 17 м/с (в основном 8–12 м/с), а над Черным морем – от 1 до 6 м/с (только один день скорость ветра достигала 10–12 м/с). Ветер отмечался практически всех направлений.

По данным радиозондирования в утренние часы в основном наблюдалась устойчивая стратификация в виде инверсий или изотермий, особенно в приводном слое. Причем она сохранялась в течение всего дня независимо от скорости ветра. Атмосферное давление изменялось от 1025 гПа над Балтикой до 997 гПа вблизи Севастополя. Из явлений погоды отмечалась только дымка при видимости более 4 км, а над Балтикой и дождь.

Более сложные условия погоды и турбулизированное состояние атмосферы над Балтикой определили и результаты экспериментов. Средние значения ПВХ созданных образований вблизи Балтийска и Севастополя представлены в табл. 4. Анализ ее данных показывает, что во втором случае они больше, чем в первом, по длине и времени существования в 1,5 раза, по мощности в 1,2 раза и по ширине в 10 раз. Причем это без учета аномально больших размеров созданного облака, зафиксированного один раз со спутника.

Таблица 4

Средние ПВХ созданных образований в природных экспериментах над Балтийским и Черным морями

Район эксперимента	Длина, м	Мощность, м	Ширина, м	Время существования, мин
Балтийское море	800	150	50	5400
Черное море	1300	180	530	800 × 1000
С учетом экстремального случая, заснятого со спутника	53500	180	1320	800000

Таким образом, проведенные натурные эксперименты над морем показали, что основное влияние на изменение ПВХ создаваемых облачных образований с использованием МС оказывают такие факторы, как:

1) стратификация нижней части пограничного слоя атмосферы (устойчивая стратификация способствует увеличению ПВХ создаваемых образований, а неустойчивая – уменьшению);

2) направление движения корабля относительно ветра (β) и скорость его движения. Наибольший эффект по созданию ИОО достигается при движении корабля-постановщика строго против ветра ($\beta = 0$). Этот эффект даже на некоторое время может перекрывать влияние неустойчивости в пограничном слое атмосферы. При боковом ветре ($\beta > 0$) и тем более попутном ПВХ уменьшаются;

3) скорость ветра в районе проведения натурных экспериментов. Она оказывает двойное влияние. Ветер менее 2 м/с и связанная с ним турбулентность способствуют сохранению ИОО, и оно рассеивается медленно. Ветер более 5–6 м/с при движении корабля строго против ветра способствует созданию мощного спутного следа за ним и повышению устойчивости ИОО, а связанная с ним турбулентность быстро рассеивает созданное облако, особенно при боковом ветре.

Кроме того, было установлено, что, вопреки ожиданию, влияние относительной влажности на ПВХ создаваемых облаков не прослеживается. Это можно объяснить либо тем, что облако аэрозольное и вносимый реагент негигроскопичен, либо тем, что велик эффект вовлечения влаги с поверхности воды из-за сильной наведенной турбулентности.

Такие характеристики погоды, как атмосферное давление, температура воздуха и воды, по абсолютному значению влияния не оказывали, хотя бы из-за их малых колебаний.

Угол подъема облака колеблется в натуральных экспериментах на порядок от 3 до 31° в зависимости от скорости набегающего потока и стратификации приводного слоя воздуха. В аэродинамической трубе он составил 11° при скорости обтекания 26 м/с, что больше скорости набегающего воздуха на корабль-постановщик.

В целом результаты натурных и лабораторных экспериментов совпадают как по виду циркуляции, так и по ее интенсивности. Наибольший эффект в создании ИОО при

этом достигается при движении корабля-постановщика на максимальной скорости и строго против ветра. При боковом ветре облако за подветренным бортом сваливается на воду и не развивается. При создании облака при дрейфе корабля оно развивается по вертикали и неустойчиво по времени существования.

Результаты натурных экспериментов в основном совпадают и с результатами численного моделирования, в котором угол подъема $\alpha = 7^\circ$ ($\alpha = 0,1$). Однако угол расхождения вихря по горизонтали $\gamma = 11^\circ$. Это можно объяснить рассмотрением плоской модели корабля (без палубных надстроек).

В заключение следует отметить, что для уменьшения вероятности возникновения антропогенных облачных образований, возникающих за морскими судами, необходимо изменить направление движения последних относительно ветра, причем таким образом, чтобы ветер был боковым. Кроме того, можно также осушать выхлопные газы, удаляя их от состояния насыщения, что можно достичь путем установки различных фильтров и очистителей.

1. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 752 с.
2. Мазуров Г.И. Метеорологические условия и полеты вертолетов. СПб: Гидрометеоздат, 1992. 254 с.
3. Мазуров Г.И., Мушченко П.М., Бушуева Е.И. Оценка вклада топлива в образование облачных полос за морскими судами // Труды ГГО. 1991. Вып. 536. С. 58–69.
4. Руководство по использованию спутниковых данных в анализе и прогнозе погоды / Под ред. И.П. Ветлова, Н.Ф. Вельтищева. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 300 с.
5. Охрана окружающей среды / А.М. Владимиров, Ю.И. Ляхин, Л.Т. Матвеев, В.Г. Орлов. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 424 с.
6. Григорьев А.А., Лунатов В.Б. Дымовые загрязнения атмосферы по наблюдениям из космоса. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 36 с.
7. Борисенко Е.П., Ефимова Л.К. Особенности влияния локализации перистой облачности на температуру и динамику атмосферы // Труды ГГО. 1986. Вып. 503. С. 76–81.
8. Зуев В.Е., Зуев В.В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 232 с.
9. Зайцев В.А., Кудрявцев Б.П., Ледохович А.А. Возможности и пути создания полей искусственных облаков // Метеорология и гидрология. 1977. № 7. С. 3–16.
10. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 455 с.
11. Матвеев Л.Т. Динамика облаков. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 312 с.
12. Белоцерковский С.М., Васин В.А., Локтев Б.Е. К математическому нелинейному моделированию нестационарного обтекания несущего винта // ДАН СССР. 1983. Т. 240. № 6. С. 1320–1323.
13. Риль Г. Климат и погода в тропиках / Пер. с англ. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 605 с.
14. Мушченко П.М. Использование возможности рассеяния тумана с помощью турбовинтовых двигателей // Сб. трудов ЛГМИ. 1973. Вып. 90. С. 96–107.
15. Борисенков Е.П. Климат и деятельность человека. М.: Наука, 1982. 133 с.

V.S. Komarov, G.I. Mazurov, V.P. Belogub. Comparative Analysis of Development Conditions for Anthropogenic and Artificial Clouds and Fogs Above Sea.

The results of numerical, laboratory and field experiments on creation and development of artificial cloudy formations downstream of sea ships are presented. The conditions of their development are shown to be identical to those of the cloud formations of anthropogenic origin. These conditions can be varied and the probability of the anthropogenic cloudy formations can be lowered to some extent or the creation of the artificial ones may be stimulated due to a use of aerodynamic wake and some reagents.