

Г.И. Мазуров

УСЛОВИЯ РАЗВИТИЯ АНТРОПОГЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ ОБЛАКОВ И ТУМАНОВ

В настоящее время известно не менее 7 разновидностей облаков и туманов антропогенного происхождения. Они изменяют радиационный режим, а также термодинамические характеристики приповерхностного слоя воздуха и оптические свойства атмосферы.

Анализируются условия их развития и результаты численных, лабораторных и натуральных экспериментов. Натурные эксперименты проводились с использованием вертолетов и кораблей. Показано, что условия развития антропогенных и искусственных облаков и туманов однообразны. Их можно изменять.

С каждым годом увеличивается экологическая нагрузка на окружающую природную среду и в том числе на атмосферу. В результате в настоящее время можно выделить не менее 7 разновидностей облачных образований антропогенного происхождения (АОО) – это облачные следы за самолетами [14], за вертолетами [10], за морскими судами (МС) [11, 18], аэродромные (печные) туманы [14], смоги (фотохимические) туманы [16], облачные шлейфы от труб промышленных предприятий [16] и от крупных пожаров, особенно лесных [5].

Некоторые их пространственно-временные характеристики (ПВХ) и условия возникновения представлены в табл. 1. Анализ последних показывает, что они достаточно разнообразны по температуре воздуха (от -28°C для самолетных облачных следов до $+32^{\circ}\text{C}$ для следов за МС 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, в частности для борьбы с заморозками в интересах сельского хозяйства.

По данным Е.П. Борисенкова [2], искусственно созданная перисто-слоистая и высоко-слоистая облачность может изменять температуру приземного воздуха на $3-5^{\circ}$ за сутки.

По данным [10, табл. 10.1] можно судить, что при непреднамеренном возникновении облачных полос при полетах вертолетов температура у подстилающей поверхности (ПП) повышается от $0,5$ до $2,5^{\circ}$ за час, а относительная влажность воздуха при этом понижается. Последнее можно объяснить как повышением температуры, так и перекачкой водяного пара вверх в слой возникающих облачных полос.

Кроме того, все перечисленные АОО ухудшают экологическую обстановку (например, задымляя территорию) [16] и затрудняют наблюдения из космоса в оптическом диапазоне [7].

В целом к физико-метеорологическим условиям возникновения облачных образований неконвективных форм можно отнести следующие: 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) повышенную влажность воздуха, часто близкую к 100% (см. табл. 1); 5) наличие ядер конденсации; 6) эффект смешения воздушных масс (ВМ); 7) вертикальные движения, характерные для данной разновидности образований.

Анализируя эти условия, следует сказать, что первые три искусственно создать нельзя, а можно только разрушить задерживающий слой, например, с помощью метеотрона [8] 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 неконвективной облачности или тумана без задержи-

вающего слоя. Именно под этими слоями скапливаются влага и различные атмосферные примеси, выступающие как ядра конденсации. Такому скоплению способствует штиль или слабый ветер. В результате начинается конденсация или сублимация водяного пара. Она усиливается и при смешении воздушных масс.

Т а б л и ц а 1

Некоторые характеристики антропогенных облаков и туманов

| № п/п | Вид образования | Температурный режим, °С | Относительная влажность, % | Скорость ветра, м/с | Время суток | Геометрические размеры | |
|-------|---|---|--|---------------------|------------------|--|---|
| 1 | Облачные следы за самолетами | ниже – 28 → – 36 → – 39 | при $f = 100$ при $f = 60$ при $f = 0$ | любая | круглые сутки | тысячи км в длину и до 1 км в ширину | |
| 2 | | за вертолетами | ниже – 15 | выше 85 | менее 3 | → – | по площади 10– 100 км ² |
| 3 | | за морскими судами | от + 32 и ниже, включая отрицательные температуры | выше 70 | от штиля до 5 | → – | до 1000 км в длину и до 50 км в ширину |
| 4 | Аэродромные (печные) туманы | ниже – 30 | выше 60 | от штиля до 3 | → – | по площади 10– 100 км ² | |
| 5 | Смоги (фотохимические туманы): Лос-Анджелес | + 24 ... +32 | 60–70 | штиль | полдень | по площади от 100 до 1000 км ² | |
| | Лондон | – 1 ... + 4 | 80–100 | до 3 | ночь, утро | → – | |
| 6 | Облачные шлейфы за трубами промышленных предприятий | при любых температурах, интенсивнее при отрицательных | менее 100 | любая | круглые сутки | в длину 100–200 км | |
| 7 | Облачные шлейфы от крупных пожаров, особенно лесных | при любых температурах | менее 100 | любая | круглые сутки | в длину до 5600 км, в ширину до 400 км | |

П р и м е ч а н и е. Во всех случаях антропогенное образование развивается под задерживающим слоем в виде инверсии или изотермии.

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 осушению воздуха.

Роль гигроскопических ядер конденсации хорошо известна [14]. Ядра можно вносить искусственно, так же как и дополнительное увлажнение, например, в способе создания облаков верхнего и среднего ярусов [6]. Здесь также играет роль эффект смешения ВМ.

Особенно подробно следует остановиться на 7-м условии. Это – наличие восходящих потоков или определенной циркуляции в облаке. Действительно, известно [13], что каждому виду облаков присущи определенные вертикальные движения. Они и обеспечивают существование облака как единого целого. В нем поддерживается циркуляция по замкнутому контуру. Это подтверждают фотоснимки из космоса [18], на которых зафиксирована искусственная облачность, образовавшаяся за самолетами и кораблями в их аэродинамическом спутном следе. Эта облачность оказывается в определенных условиях достаточно устойчивой и имеет большую горизонтальную протяженность (см. табл. 1).

Искусственно наведенная циркуляция может быть создана, например, в спутном аэродинамическом следе таких подвижных аппаратов, как самолет, вертолет и МС. Это позволит стимулировать создание искусственных облачных образований (ИОО) неконвективных форм и увеличить значения их ПВХ.

Поскольку АОО развиваются под инверсиями, то для определения вероятности их возникновения была рассмотрена повторяемость инверсий в атмосферном пограничном слое

(АПС). Она в климатическом плане оказалась очень высокой. Так, зимой повторяемость инверсий над территорией РФ составила 80–90% (над Арктикой – более 90%), а летом в утренние часы – 60–80%. В оперативном плане кроме данных радиозондирования целесообразно использовать акустический зонд [4] для определения высоты задерживающего слоя. В связи с тем что в нашем распоряжении его не было, при проведении натурных экспериментов приходилось использовать ракетницу или дымовое ружье. При выстреле вертикально вверх дымовой след искривляется за счет сдвига ветра на верхней границе инверсии – ниже ее располагается оптимальная высота введения реагента. Кроме того, в период планирования работ нами составлялась специальная карта 300-метрового слоя, характеризующая распределение вертикального градиента температуры γ в этом слое на территории, охватываемой кольцевой картой Московской области. Методика составления подобной карты по данным радиозондирования описана в [12].

С целью определения геометрических размеров аэродинамического спутного следа, возникающего за вертолетом, было проведено его численное моделирование с использованием метода дискретных вихрей [11] на первых витках раскручивания несущего винта.

При рассмотрении дальних аэродинамических полей вертолета использовалось открытие А.В. Ларина и В.И. Маврицкого [9] о вторичном вихреобразовании, при котором циркуляция происходит по замкнутому контуру. В итоге при внесении в него водяного пара или реагента получается, что они сосредоточиваются в полужамкнутом пространстве. Это приближает результаты натурных экспериментов к лабораторным.

Всего было проведено более 10 серий натурных экспериментов по созданию ИОО с использованием вертолетов типа Ми-6 и Ми-8. Они проводились в средней полосе РФ в зимний и летний периоды при температурах воздуха от -27 до $+32$ °С в пределах атмосферного пограничного слоя. Атмосферное давление изменялось от 990 до 1027 гПа. Влажность воздуха колебалась в пределах от 27 до 100%, а скорость ветра изменялась от 0 до 10 м/с у земли и достигала 60 км/ч на рабочих высотах.

По данным радиозондирования в утренние и вечерние часы, как правило, наблюдалась приземная инверсия, а в теплый период днем – слабая неустойчивость вплоть до конвекции. Из явлений погоды отмечались дымка, дождь, а зимой снег.

В зависимости от погодных условий изменялись и результаты эксперимента. Анализ результатов показывает, что ПВХ созданных облаков наиболее сильно зависит от термодинамической устойчивости слоя воздуха. Так, максимальные размеры облака отмечались 9 июня в вечерние часы, когда развивалась приземная инверсия. При этом с усилением последней к 20 ч размеры облака увеличивались при выпуске реагента в том же количестве и на той же высоте и скорости полета 120 км/ч. Максимальные размеры созданного облака составили через 3 мин 500×260 м. Одно из них сохранялось более 10 мин, а другое слилось с фоном облачности.

С целью повышения эффективности создания искусственных облачных образований над морем также было проведено численное, гидро- и аэродинамическое моделирование модели корабля для установления характеристик спутного аэродинамического следа. Как и в случае с вертолетом, обращалось особое внимание на роль 7-го условия развития облаков, а именно создание искусственно наведенной циркуляции по замкнутому контуру.

Если в работах Л.Г. Качурина [8] в основном исследуются изменения термогигрометрических характеристик горизонтальных струй вообще и аэродинамического спутного следа в частности, то нами обращалось внимание на исследование ПВХ последнего и его интенсивности.

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

В аэродинамической трубе объемная модель корабля обдувалась под углом $\beta = 0, 30, 90$ и 180° . В гидротомке исследовалась также объемная модель. В первом случае с помощью метода парового экрана [1] лучше прослеживалась вихревая структура аэродинамического следа, а во втором – ось вихря, выявляемая подкрашенной стружкой. Это позволило определить оптимальные точки установки форсунок для ввода реагента и режим их работы.

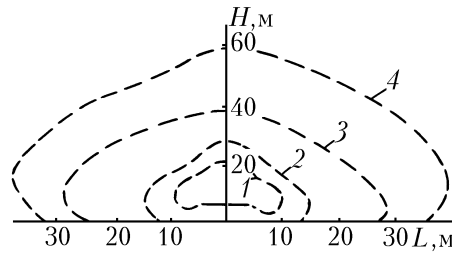


Рис. 1. Форма и размеры зон активного турбулентного перемешивания (аэродинамического спутного следа), перпендикулярных продольной оси корабля, полученных при численном моделировании плоской модели корабля, на расстояниях от его носовой части: 1 – 65; 2 – 140; 3 – 260; 4 – 455 м

Угол подъема вихревого следа α при аэродинамическом обдуве составил 11° , 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.

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 | – | 6,0 | – | 1,4 | – |
| II | 8,4 | 10 | 2,25 | 2,4 | 10,0 | 13 | 3,0 | 4,5 |
| III | 15,5 | 17 | – | 2,8 | 14,5 | 18 | – | – |
| IV | 17 | – | – | – | 14,0 | 20 | – | – |
| V | 16 | – | – | – | 14,0 | 28 | – | – |

Анализ данных табл. 2 показывает удовлетворительное совпадение рассчитанных и реальных характеристик, поскольку их порядок одинаков, а значения в натуральных 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 эксперименте и корабля в натуральных испытаниях. Так, в обоих случаях воздушный вихрь с подветренного борта «сваливается» на поверхность раздела (воду) и не развивается. Это говорит о том, что форсунки на этом борту следует отключить для экономии реагента. В целом, естественно, картина вихревых потоков в эксперименте более идеализирована, чем в натуральных испытаниях, однако стоимость последнего на 2–3 порядка выше.

Условия развития облачных полос за МС сравнивались с условиями развития аналогичных полос, образующихся за небольшими (диаметр менее 50 км) островами [17]. 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% для положительной температуры и при влажности 95% для отрицательной [11].

Кроме такого достаточно прямолинейного расчета дополнительного увлажнения аэродинамического следа МС за счет сжигания топлива была оценена роль изобарического смешения выхлопных газов и окружающего воздуха в образовании облачных следов за МС. Известно, что при таком смешении 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 [15] влажность смеси газов можно определить по формулам:

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

$$e(T) = \frac{(\ln e_1 - e_2)(T - T_1) + e_2(T_1 - T_2)}{(l - 1)(T - T_2) + (T_1 - T_2)}, \quad (2)$$

где $l = c_{p_2}/c_{p_1}$ – отношение теплоемкостей; e – парциальное давление водяного пара; s – его массовая доля. Температура и характеристики влажности с индексами «1» и «2» относятся к смешиваемым массам, а без них – к смеси.

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

$$s(T) = (\Delta s/\Delta T)(T - T_2) + s_2, \quad e(T) = (\Delta e/\Delta T)(T - T_2) + e_2. \quad (3)$$

Эти соотношения позволяют по известным начальным значениям характеристик смешивающихся газов определить влажность при любых температурах смеси газов T , варьирующих 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 [14]. Эти касательные и все секущие характеризуют процессы, при которых образуются облачные следы, а ниже касательной следы не образуются. Более высокие температуры образования облачных следов за МС по сравнению со следами за самолетами и вертолетами [10, 14] объясняются 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 $\Delta s/\Delta T = 0,0336 \cdot 10^{-3} (\text{C}^\circ)^{-1}$, а для МС это отношение 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 температурах выше 28°C , тем более в связи с планируемым переходом на топливо с большим содержанием водорода [3]. Впрыскивая воду в выхлопные газы или увеличивая каким-либо образом в них содержание водорода, который может окислиться, возможно создание искусственных облачных полос за МС. Наоборот, охладив и осушив выхлопные газы, можно уменьшить вероятность образования таких полос антропогенного происхождения.

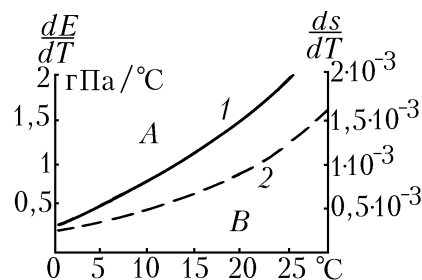


Рис. 2. Зависимость образования облачных следов за МС при изобарическом смешении выхлопных газов и воздуха от температуры и влажности последнего и свойств топлива. Область A – полосы возникают, B – не образуются. Зависимость от температуры dE/dT (кривая 1) и ds/dT (кривая 2)

С учетом описанных выше теоретических разработок были проведены натурные эксперименты по созданию ИОО над Балтийским и Черным морями в летний период. Гидрометеорологическое обеспечение осуществляла экспедиционная группа из 15 человек, возглавляемая автором. 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. Выполнялась также фото-, видео- и кино-регистрация 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, с кормы 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 типовым. Наиболее перспективными в смысле устойчивости ИОО оказались способы, когда корабль-постановщик перемещался строго против ветра, выпуская реагент соответственно с кормы или с носовой части.

Кроме результатов стандартных метеонаблюдений использовались результаты градиентных измерений до высоты 8–12 м на корабле-измерителе, а также привязного радиозонда до высоты 90 м. Над сушей подобная информация была получена до высоты 300 м с дискретностью через 10 м. Осуществлялась привязка к информации ближайшего стандартного радиозонда, выпускаемого через 6 ч. Из гидрологических наблюдений осуществлялось измерение температуры воды до глубины 40 м. Из высотных карт использовались для анализа карты АТ-925 и АТ-850.

На создание ИОО основное влияние оказывало состояние приводного слоя, на анализе которого и сосредоточивалось особое внимание. Влияние вектора ветра на устойчивость создаваемого ИОО проверялось путем постановки его при движении корабля-постановщика со скоростью 50 км/ч по окружности с 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-3». 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 60 000 м² через 1 мин, увеличившись через 15 мин до 800 000 м².

Т а б л и ц а 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 | 60 000 | 720 000 | 800 000 |

Со спутника созданное облако удалось зафиксировать 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 радиозонда за 09 ч.

В целом в экспериментах над морями температура воздуха изменялась от 12°С над Балтийским до 25°С над Черным, а воды соответственно от 13 до 24°С. Влажность колебалась от 100 до 54%, т.е. более высокая отмечалась над Балтикой, а низкая – над Черным морем. Аналогично и волнение воды: в первом случае было 2–3 балла, а во втором 1–2 балла и были дни со спокойным морем. Это соответственно определялось скоростью ветра. Так, над Балтикой она колебалась от 2 до 17 м/с (в основном 8–12 м/с), а над Черным морем 1–6 м/с и только один день – 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 последней 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, зафиксированных один раз со спутника.

Проведенные натурные эксперименты над морем позволяют сделать ряд выводов. Основное влияние на изменение ПВХ создаваемых образований с использованием МС оказывают:

1. Стратификация нижней части АПС (устойчивая способствует увеличению ПВХ ИОО, 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 АПС. При боковом ветре ($\beta > 0$) и тем более попутном ПВХ уменьшаются.

3. Скорость ветра, которая воздействует двояко. Ветер менее 2 м/с и связанная с ним слабая 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 интенсивная турбулентность быстро рассеивает созданное облако, особенно при боковом ветре.

Таблица 4

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

| Виды ПВХ | Длина, м | Мощность, м | Ширина, м | Время существования, мин |
|---|----------|-------------|-----------|--------------------------|
| Балтика | 800 | 150 | 50 | 8 |
| Черное море | 1300 | 180 | 530 | 13 |
| С учетом экстремального случая, заснятого со спутника | 5350 | 180 | 1320 | 22 |

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 α колеблется в натурных экспериментах на порядок от 3 до 31° в зависимости от скорости набегающего потока и стратификации приподнятого слоя воздуха. В аэродинамической трубе он составил 11° при скорости обтекания 26 м/с. Это в основном 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 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 $\alpha = 7^\circ$ ($\text{tg}\alpha = 0,1$). Однако угол расхождения вихря по горизонтали $\gamma = 11^\circ$. Это можно объяснить рассмотрением плоской модели корабля (без палубных надстроек).

В целом анализ аэрометеорологических условий развития облачных образований антропогенного происхождения и создаваемых искусственно показывает их идентичность. Кроме чисто аэрометеорологических условий, перечисленных в начале статьи, важным стимулятором развития является 7-е условие. Это мощная турбулизирующая зона возмущенного воздуха, возникающая при полете самолета и вертолета и при движении МС. При наличии задерживающего слоя атмосферы над ней обеспечивается перемешивание ВМ с различными свойствами и сосредоточение в ней продуктов сгорания топлива в виде дополнительного увлажнения и ядер конденсации. Термогигрометрические условия возникновения АОО могут быть изменены в сторону как увеличения, так и уменьшения вероятности их возникновения.

Первое достигается в основном за счет воздействия на последние четыре условия, указанные в начале статьи. Эффективным и достаточно новым является влияние, оказываемое воз-

действием на 7-е условие, т.е. наведение искусственной циркуляции путем создания аэродинамического спутного следа. В результате введенный реагент попадает в пространство с циркуляцией по замкнутому контуру и перемещается как единое целое, медленно разрушаясь под действием атмосферной циркуляции.

Правда, практически во всех случаях расширения граничных условий геометрические размеры созданных образований и их устойчивость оказываются на 1–2 порядка меньше, чем у образований антропогенного происхождения (см. табл. 1 и 4). Это можно объяснить тем, что многие тысячи летательных аппаратов и МС бороздят просторы соответственно воздушного и водного океанов и лишь единицы из них попадают в слой атмосферы, находящийся в метастабильном состоянии. Провести натурные эксперименты в таких условиях практически не удалось.

Уменьшить вероятность возникновения антропогенных образований для летательных аппаратов можно путем изменения эшелона, т.е. выполнять полет выше задерживающего слоя [10] или в слое с пониженной влажностью, а для МС – изменяя направление движения относительно ветра, т.е. так, чтобы ветер был боковой. Кроме того, у МС можно осушать выхлопные газы либо уменьшать содержание водорода.

Вероятность возникновения смогов можно уменьшить путем проветривания АПС с помощью метеотрона.

1. Белорецкий С.М., Васин В.А., Локтев Б.Е. К математическому нелинейному моделированию нестационарного обтекания несущего винта // ДАН СССР. Т. 240. N 6. С. 1320–1323.
2. Борисенков Е.П., Ефимова Л.К. Особенности влияния локализации перистой облачности на температуру и динамику атмосферы // Труды ГГО. 1986. Вып. 503. С. 76–81.
3. Борисенков Е.П. Климат и деятельность человека. М.: Наука, 1982. 133 с.
4. Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере: Пер. с англ. / Под ред. Г.С. Голицына. М.: Мир, 1978. 532 с.
5. Григорьев А.А., Липатов В.Б. Дымовые загрязнения атмосферы по наблюдениям из космоса. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 36 с.
6. Зайцев В.А., Кудрявцев Б.П., Ледохович А.А. Возможности и пути создания полей искусственных облаков // Метеорология и гидрология. 1977. N 7. С. 3–16.
7. Зуев В.Е., Зуев В.В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 232 с.
8. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 455 с.
9. Ларин А.В. Вихревой след за вертолетом // Авиация и космонавтика. 1976. N 3, 4. С. 32–33.
10. Мазуров Г.И. Метеорологические условия и полеты вертолетов. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 254 с.
11. Мазуров Г.И., Мушенко П.М., Бушуева Е.И. Оценка вклада топлива в образование облачных полос за морскими судами. // Труды ГГО. 1991. Вып. 536. С. 58–69.
12. Мазуров Г.И., Олиферук А.Ф. // Объективная оценка метеоинформации при обеспечении полетов: Сб. трудов ОЛАГА: Л., 1983. С. 102–106.
13. Матвеев Л.Т. Динамика облаков. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 312 с.
14. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 752 с.
15. Мушенко П.М. // Исследование возможности рассеивания тумана с помощью турбовинтовых двигателей: Сб. трудов ЛГМИ. 1985. Вып. 90. С. 96–107.
16. Охрана окружающей среды / А.М. Владимирова, Ю.И. Ляхин, Л.Т. Матвеев, В.Г. Орлов. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 424 с.
17. Риль Г. Климат и погода в тропиках: Пер. с англ. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 605 с.
18. Руководство по использованию спутниковых данных в анализе и прогнозе погоды / Под ред. И.П. Ветлова, Н.Ф. Вельтищева. Л.: Гидрометеоздат, 1982. 300 с.

Российский государственный гидрометеорологический институт,
Санкт-Петербург

Поступила в редакцию
28 ноября 1995 г.

G. I. Mazurov. **Conditions for Formation of Anthropogenic and Artificial Clouds and Fogs.**

No less than 7 modifications of clouds and fogs are presently known. They change the radiation regime and thermohygrometric characteristics of the air surface layer and optical properties of the atmosphere. The conditions for the clouds and fogs formation are analysed in the paper together with the results of numerical, laboratory, and field experiments conducted with use of helicopters and ships. The conditions for anthropogenic and artificial clouds and fogs formation are shown to be identical and susceptible to changes.