

26
778
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Труды, выпуск 14

ОБЛАКА, ОСАДКИ И ВОПРОСЫ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

175263

БИБЛИОТЕКА
ЛЕНИНГРАДСКОГО
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА

ЛЕНИНГРАД
1963

М. А. ГЕРМАН

НЕКОТОРЫЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ТУРБУЛЕНТНОГО ОБМЕНА В ОБЛАКАХ

В ряде исследований, выполненных в последние годы, рассмотрен вклад турбулентного переноса влаги в формирование пространственной и внутренней структуры облаков. Однако, несмотря на это, количественные характеристики турбулентного обмена в облаках до сих пор изучены мало, поскольку до последнего времени отсутствовали надежные методы определения этих характеристик.

Появление работ А.С.Дубова [7,8], Л.Т.Матвеева [15], Д.Л.Лайхтмана [11,12] позволило в определенной степени восполнить пробел в изучении турбулентного состояния свободной атмосферы и облаков. Вместе с тем еще далеко не все вопросы являются решенными окончательно.

В настоящее время по данным научно-исследовательских полетов накоплен уже довольно обширный материал, позволяющий охарактеризовать турбулентное состояние свободной атмосферы и различных облаков. Используя данные этих полетов, автором была предпринята попытка исследовать турбулентный обмен в облаках.

Для изучения турбулентного режима были использованы акселерографические записи перегрузок самолетов в облаках, полученные во время специальных полетов ЦАО, Гос.НИИ ГВФ, ГГО, АНИИ. В полетах 1957-58 и 1962 гг. принимал непосредственное участие автор.

В качестве дополнительного материала использованы бортовые журналы визуальных наблюдений за формой и количеством облаков, проводившихся бортаэрологами, а также данные температурно-ветрового зондирования в этих пунктах.

1. Материал и методика исследования

Изучение турбулентного обмена в облаках производилось на специально оборудованных самолетах. Основным прибором, с помощью которого регистрировалась турбулентность (перегрузки самолета), был акселерограф, состоящий из потенциометрического датчика перегрузок, установленного в центре тяжести самолета, и оптического само-

писца К4-51.

В качестве индикатора времени в схему прибора обычно включались электрические часы, производящие отметку времени через 1,0 сек. Самописцем К4-51 регистрировалась также температура воздуха, прозрачность облаков (атмосферы), влажность и температурные пульсации. С этой целью на самолете устанавливалось два самописца.

Для большинства полетов температура воздуха измерялась с помощью самолетного экранированного термометра конструкции В.А.Зайцева и А.А.Ледоховича или электрометеорографа ЦАО (с введением соответствующих поправок) [9, 24].

Количество и форма облаков определялись визуально бортаэрологами.

Вход и выход из облаков регистрировался с помощью измерителя прозрачности Г.М.Забродского [9], а при отсутствии приборов - визуально.

Отбору акселерографических записей для их последующей обработки предшествовала критическая оценка условий получения данных. В частности, обязательным требованием являлось сохранение постоянной скорости и высоты полета для каждого случая (горизонтальной площадки). Вмешательство летчика в управление самолетом на горизонтальной площадке обычно было минимальным (в пределах, необходимых для обеспечения безопасности полета).

Продолжительность полета по горизонтали в момент исследования в среднем была 120 сек. В некоторых случаях полетов на больших высотах такой временной интервал не всегда был осуществим, что связано со спецификой полета в облаках. В таких случаях использовались акселерографические записи продолжительностью не менее 50 сек. Количество записей на таких площадках составляет примерно 6% всех случаев, рассмотренных в работе.

Исследования, выполненные А.П.Суренсоном [25], показывают, что интервал времени в 120 сек. достаточно хорошо обеспечивает изучение ряда важных характеристик турбулентного режима свободной атмосферы.

Выбор указанного интервала времени вполне обеспечивает исследование турбулированного слоя с горизонтальной протяженностью от 7000 до 25 000 м.

Время и районы исследовательских полетов, типы самолетов, количество горизонтальных площадок в облаках и вне облаков приведены в табл.1.

Всего было исследовано 1120 записей с болтанкой самолетов; 60,0% записей получены при полетах в облаках и 40,0% записей - вне облаков.

Облака нижнего, среднего ярусов и частично облака вертикального развития исследовались с помощью винтомоторных самолетов Ли-2 и Ил-12. Облака верхней тропосферы и нижней стратосферы прозондированы скоростными самолетами Ту-104, Ту-104Б и Ил-18.

Маршруты полетов охватывают многие географические районы страны с разными климатическими условиями формирования облаков. Это обеспечивает возможность сравнения полученных выводов о турбулентности в облаках в тех или иных районах.

Таблица 1

Исходные данные научно-исследовательских полетов,
использованных при изучении турбулентного режима
в облаках

| № п/п | Географический район, сезон и год исследо- вания | Тип самоле- тов | Число случаев | | Общее число случаев |
|----------|--|----------------------------|----------------|----------------|---------------------------|
| | | | в обла- ках | вне облаков | |
| 1 | ЕТС, Средняя Азия, зима, 1957 г. | Ту-104 | - | 28 | 28 |
| 2 | Арктика, лето, 1957 г. | Ил-12 | 87 | 136 | 223 |
| 3 | Северо-западная часть ЕТС, осень-зима, 1957 г. | Легкий истре- битель | - | 44 | 44 |
| 4 | Центральная часть ЕТС, зима, 1957-58 г. | Ли-2 | 54 | - | 54 |
| 5 | Центральная часть ЕТС, Средняя Азия, лето, 1958 г. | Ту-104 | 44 | 5 | 49 |
| 6 | Арктика, лето, 1959 г. | Ил-12 | 37 | - | 37 |
| 7 | Центральная часть АТС, лето-осень, 1959 г. | Ил-14 | 26 | - | 26 |
| 8 | Северо-западная часть ЕТС, осень, 1960 г. | Ли-2 | 51 | 10 | 61 |
| 9 | Дальний Восток, Средняя Азия, весна-лето, 1960 г. | Ил-18, Ту-104Б | 65 | 85 | 150 |
| 10 | Дальний Восток, Сред- няя Азия, лето-осень, 1960 г. | Ту-104Б | 93 | 49 | 142 |
| 11 | Северо-западная и юго- западная части ЕТС, зима, весна, лето, 1961 г. | Ли-2 | 88 | 36 | 124 |
| 12 | Северо-западная часть ЕТС, лето, 1962 г. | Ли-2 | 126 | 56 | 182 |

Применение различных типов самолетов является недостатком ис-
пользованного материала, что в некоторой степени осложняло его
обработку.

Распределение количества случаев по ярусам и полугодиям пред-
ставлено в табл.2. В теплое полугодие в облаках исследовано 519
случаев, из них 124 в арктических районах. В холодное полугодие
в Арктике облака не исследовались, а в умеренных широтах рассмот-
рено 152 случая.

Число площадок, на которых производились измерения, было боль-
шим и поэтому результаты, полученные при обработке, можно считать
более или менее надежными.

П. Методика обработки акселерографических записей
болтанки самолетов в облаках

В качестве исходных данных для анализа были использованы зна-
чения ординат h_i , снятых с акселерограмм через промежутки вре-

Таблица 2

Количество горизонтальных площадок в облаках
в зависимости от полугодия

| Полу- годие | Умеренные широты | | | | | Арктика | | | | Всего случа- ев |
|---------------------------|--------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------------------|------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| | обл. верт. разви- тия | ниж- ний ярус | сред- ний ярус | верх- ний ярус | вне обла- ков | облака верт. разви- тия | ту- ман | ниж- ний ярус | вне обла- ков | |
| Теплое | 128 | 87 | 36 | 144 | 211 | 11 | 9 | 104 | 136 | 866 |
| Холод- ное | 15 | 107 | 30 | - | 102 | - | - | - | - | 254 |
| Общее число случаев | 143 | 194 | 66 | 144 | 313 | 11 | 9 | 104 | 136 | 1120 |

мени $\tau = 0,5$ сек. с точностью до $0,1$ мм. В тех случаях, когда скорость развертки самописца была недостаточно большой, проводилось дополнительное построение нового графика, но при более "растянутом" масштабе времени, чем на акселерограмме. После снятия ординат вычислялись абсолютные значения разностей Δh между произвольной величиной ординаты h_i и средней ординатой \bar{h} на горизонтальной площадке.

Переход от абсолютных значений разностей ординат к значениям перегрузок Δn (где $\Delta n = n - 1$ в долях g) осуществлялся при помощи тарировочных графиков, приданных к каждому датчику перегрузок. Осреднение перегрузок, необходимое для дальнейших расчетов, проводилось по 120 мгновенным значениям Δn

Для интервала времени менее 120 сек. количество мгновенных значений, использованных при осреднении, было соответственно меньше.

Для датчика типа МП-66, которым фиксировались перегрузки в полете, зависимость между значениями ординат и перегрузок является линейной. Тарировка датчика перегрузок во всех случаях производилась до и после окончания полетов (экспедиции) при фиксированном напряжении. Для характеристики турбулентного режима облаков можно использовать данные о величинах вертикальной пульсации скорости ветра, коэффициента турбулентности, энергетического спектра и т.д. В данной работе приводятся коэффициенты турбулентности в основных формах облаков. В работе также рассматриваются перегрузки современных самолетов и размеры турбулентных вихрей, вызывающих их болтанку.

В настоящее время известен ряд методов [8, 11, 12 и 15] для определения коэффициента турбулентности в свободной атмосфере. В нашем случае наиболее удобно пользоваться расчетными формулами, предложенными в работе [8].

В основу выполненного расчета положена структурно-кинематическая формула Ляпина-Дубова

$$K = \frac{u_z \tau \bar{v}}{2} . \quad (1)$$

Величина u_z определяется по данным акселерографических записей с помощью соотношения

$$u_z = v \Delta n, \quad (2)$$

где $v = \frac{v_0}{\Delta}$ - коэффициент, характеризующий летно-технические данные самолета,

$$v_0 = \frac{2 \frac{G}{s}}{\rho_0 C_y^a}, \quad (2)$$

τ - среднее время сохранения вертикальной пульсации одного знака, в сек., $\frac{G}{s}$ - удельная нагрузка на несущие поверхности самолета, ρ_0 - плотность воздуха, C_y^a - коэффициент, характеризующий изменение подъемной силы самолета в зависимости от угла атаки.

Величины, входящие в формулу (1), могут быть легко определены с помощью акселерографических записей и данных из технических описаний самолетов.

Величина τ определялась как разность времен начала и конца перегрузки одного знака и осреднялась для всей горизонтальной площадки.

В тех случаях, когда при исследовании акселерографом фиксировалось отсутствие перегрузок самолета, т.е. турбулизованные слои чередовались со спокойными участками полета (в пределах чувствительности акселерографа), определение времени сохранения перегрузки одного знака производилось по методике, предложенной А.С.Дубовым [8].

В подобных случаях в начале коэффициент турбулентности находилась только по участкам записи, где были возмущения, а для характеристики турбулентного состояния всей исследуемой области полученное значение множилось на отношение длины участков записи с наличием ускорений к общей длине записи.

Современные исследования показывают, что в свободной атмосфере наблюдается широкий спектр турбулентных возмущений, от размеров вихрей в несколько миллиметров до сотен и тысяч километров.

При использовании самолета для исследования атмосферы из этого широкого спектра оказываются исключенными самые мелкие и самые крупные вихри. На первые самолет не реагирует в силу значительности инерции. Вихри очень больших размеров, т.е. очень большие поднимающиеся и опускающиеся массы воздуха, либо просто "захватывают" самолет и переносят его без изменения угла атаки, либо эти изменения оказываются настолько незначительными, что при существующей точности акселерографов не могут быть выявлены на записи [8]. Так как величина турбулентного обмена определяется в первую очередь большими вихрями, то пренебрежение влиянием малых вихрей

практически не скажется на величине полученных характеристик обмена.

Ограниченность спектра вихрей сверху может в определенной степени приводить к уменьшению коэффициента турбулентности.

Для исследования этого вопроса обратимся к соотношению (2), которое учитывает переход от перегрузок, испытываемых самолетом, к вертикальным пульсациям скорости ветра. Входящий в соотношение (2) коэффициент β , строго говоря, является функцией частоты возмущений. В этой целью рассчитаны значения функции $\beta'(\omega)$ по формуле

$$\beta'^2(\omega) = \frac{(\omega^4 + 2D_1\omega^2 + D_2) + (2D_3\omega^2 + 2D_4)^2 \omega^2}{(2D_8\omega^2 + 2D_9)\omega^4 + (2D_{10}\omega + 2D_2)^2 \omega^2} \quad (3)$$

Вид кривой зависимости величины β от частоты для самолета Ли-2 представлен на рис.1.

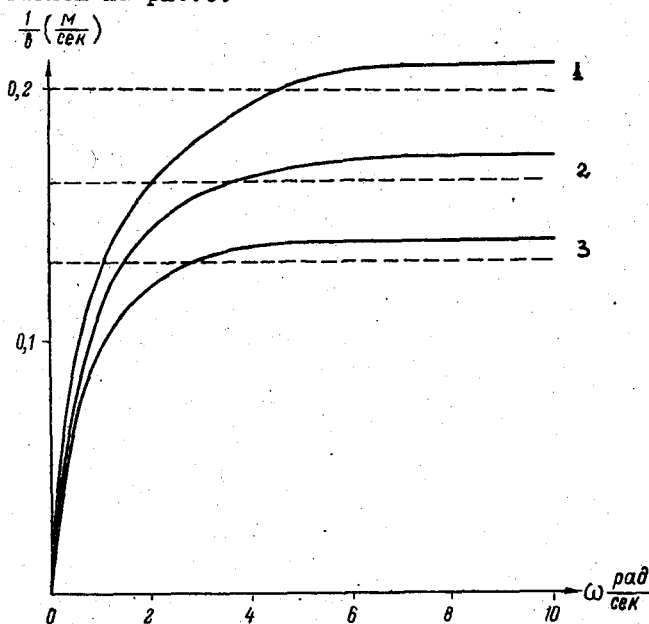


Рис.1. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ КОЭФФИЦИЕНТОВ β И β_1 ДЛЯ САМОЛЕТА Ли-2.

1 - 1000 м, 2 - 3000 м, 3 - 5000 м.

Из рис.1 видно, что особенно сильно меняется величина коэффициента при малых частотах, однако при расчетах коэффициента турбулентности используется постоянное, асимптотическое значение величины β . Это, естественно, приводит к рассмотрению только высокочастотного участка спектра возмущений, а следовательно, и к определенным погрешностям расчета.

Прежде чем оценить погрешность принятого в выражении (2) приближения, рассмотрим повторяемость значений среднего времени со-

хранения перегрузки одного знака, которое связано с частотой соотношением

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad (4)$$

где $T = 2\tau$ - время полного периода, в сек.

Повторяемость величины среднего времени сохранения перегрузки одного знака в турбулизированных слоях атмосферы ^{1/} для различных типов самолетов приведена в табл.3.

Таблица 3

Повторяемость (в %) величин среднего времени сохранения перегрузки одного знака

| Тип самолета | τ сек. | $\leq 0,60$ | 0,61-1,00 | 1,01-1,40 | 1,41-1,80 | 1,81-2,20 | 2,21-2,60 | 2,61-3,00 | Общее число случаев |
|--------------------|-------------|------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------|
| | | ω рад/сек | $\geq 5,23$ | 5,16-3,14 | 3,13-2,24 | 2,23-1,74 | 1,73-1,43 | 1,42-1,21 | |
| Легкий истребитель | 52,2 | 47,8 | - | - | - | - | - | - | 44 |
| Ли-2 | - | 0,5 | 31,1 | 49,2 | 17,3 | 1,7 | 0,2 | - | 421 |
| Ил-12 | - | 1,5 | 10,0 | 49,2 | 30,0 | 5,8 | 3,5 | - | 260 |
| Ил-14 | - | - | 15,4 | 69,2 | 15,4 | - | - | - | 26 |
| Ил-18 | - | - | - | 19,0 | 76,2 | 4,8 | - | - | 21 |
| Ту-104 | - | 2,0 | 6,9 | 38,7 | 44,6 | 7,5 | 0,3 | - | 348 |

Просмотр данных табл.3 показывает, что наибольшая повторяемость величины τ ограничивается пределами от 1,00 до 2,60 сек., что соответствует частотам 3,14-1,21 рад/сек.

Исключением является повторяемость τ для истребителя, где значение времени ограничено сверху величиной $\tau = 1,00$ сек.

Таким образом, на участок большой изменчивости коэффициента падает наибольшая повторяемость частот атмосферных возмущений, на которые реагируют современные самолеты.

Погрешность за счет использования в расчетах асимптотического значения коэффициента ν может быть определена из соотношения

$$\eta = \frac{\nu}{\nu'}, \quad (5)$$

где $\nu' = \nu(\omega)$.

Величина η в этом случае в определенной степени зависит от конструкции самолета, в частности, для большинства самолетов с "жесткой" конструкцией в рассмотренном выше диапазоне частот она обычно меньше единицы, для "нежестких" самолетов - больше единицы.

Рассмотрим это на примере. Для самолета Ли-2, летящего со ско-

^{1/} В этом случае рассмотрены полеты в облаках и внеоблачном пространстве вместе, в дальнейшем они исследуются раздельно.

ростью $V = 218$ км/час на высоте $H = 2000$ м, $\eta = 0,668$ (при $\omega = 1,05$ рад/сек.), а для самолета Ту-104 при полете на высоте $H = 8000$ м со скоростью $V = 775$ км/час при одинаковом значении частоты $\eta = 3,23$.

Таким образом, выполненные в работе расчеты показывают, что для самолетов с "жесткой" конструкцией использование коэффициента δ будет приводить к заниженным значениям, а для "нежестких" конструкций результаты расчета коэффициента турбулентности окажутся завышенными.

Учитывая это обстоятельство, в работе были рассчитаны поправочные множители для всех типов самолетов, на которых производилось зондирование.

Результаты расчета для самолета Ли-2 представлены на рис.2.

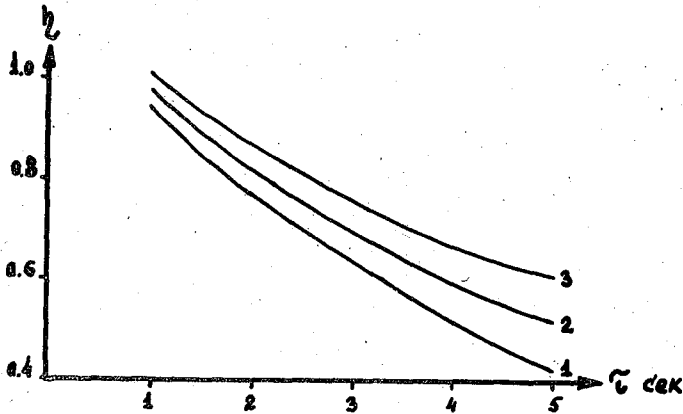


Рис.2. ЗАВИСИМОСТЬ ПОПРАВОЧНОГО МНОЖИТЕЛЯ η ОТ ВЫСОТЫ (САМОЛЕТ ЛИ-2).

1 - 1000 м, 2 - 3000 м, 3 - 5000 м.

Для "нежестких" самолетов поправочный множитель рассчитан из экспериментальных данных.

С учетом этих замечаний выражение для коэффициента турбулентности принимает вид

$$K_1 = \frac{v_0 \bar{v}}{2 \eta \Delta} \Delta n, \quad (6)$$

Используя материалы акселерографических записей, по формуле (6) рассчитаем коэффициенты турбулентности в различных формах облаков.

Размеры турбулентных вихрей, вызывающих болтанку современных самолетов, определялись из соотношения

$$\bar{L} = v \tau, \quad (7)$$

где L - размер турбулентного вихря, в метрах; v - воздушная

скорость, в м/сек.

Рассмотрим турбулентный обмен и его характеристики в основных формах облаков.

III. Перистые и перисто-слоистые облака

Интенсивное развитие авиационной техники в последнее десятилетие поставило перед метеорологией задачу детального изучения облаков верхнего яруса. Это, очевидно, определило то, что усилия ряда научно-исследовательских организаций направлены на изучение и решение этой задачи. Большое количество исследовательских полетов обеспечило накопление обширного материала, содержащего данные о температурном режиме, турбулентной структуре и т.д. По результатам полетов выполнен ряд интересных и оригинальных работ [2, 6, 10, 18, 19, 22 и 29], в которых подробно рассматриваются вопросы пространственной структуры и условия полетов в облаках верхнего яруса, синоптическая обстановка, благоприятствующая образованию этих облаков, и другие вопросы.

Вопросы турбулентного обмена в облаках верхнего яруса рассмотрены в работах [6, 10, 18, 22 и 29], которые являются одними из первых в этом направлении, так как до последнего времени исследования турбулентного режима в указанных облаках не производились. Так, в работе С.М.Шметера [22] по данным полетов Ту-104 впервые рассмотрены пространственные характеристики турбулентных зон в облаках верхнего яруса. Получены средние и максимальные значения перегрузок современных самолетов. С.М.Шметер указал на существенное различие в интенсивности турбулентного обмена в облаках в зависимости от скорости ветра (струйного течения).

Г.Д.Решетов [18] по данным 1664 наблюдений исследовал вопрос интенсивности болтанки самолетов в облаках верхнего яруса в зависимости от синоптического положения. По его данным в верхних облаках холодных фронтов и фронтов окклюзий, особенно в летнее время года, обычно наблюдается умеренная болтанка, что обусловлено, по его мнению, наличием неупорядоченных вертикальных движений, вызванных действием термического фактора в зонах этих фронтов.

Результаты, полученные этими авторами, в определенной степени восполняют пробел в изучении турбулентного режима облаков верхнего яруса. Но все же многие вопросы, в частности, такие, как количественные характеристики турбулентного обмена, масштабы турбулентных возмущений, энергетический спектр турбулентности, вызывающей болтанку самолетов в облаках, и другие, не получили освещения в специальной литературе.

Ниже приводятся результаты расчетов характеристик турбулентного обмена в перистых и перисто-слоистых облаках.

По данным акселерографических записей болтанки самолетов Ту-104 и Ил-18 рассчитаны значения величины коэффициента турбулентности и масштабы турбулентных возмущений, вызывающих болтанку современных самолетов.

Для выполнения этих расчетов использованы материалы научно-исследовательских полетов ЦАО и Гос.НИИ ГВФ за 1958 г. (июль - август) и 1960 г. (май-июнь, август-сентябрь). Одной из задач этих полетов являлось изучение облаков верхнего яруса и струйных течений. Исследования производились на скоростных самолетах Ту-104, Ту-104Б и Ил-18 над Центральной частью ЕТС, Средней Азией и районами Дальнего Востока.

Для изучения турбулентного режима было проанализировано 208 случаев, из них 144 случая в облаках и 64 вне облачного слоя (табл.4).

Таблица 4
Количество случаев с болтанкой самолета в различных формах облаков верхнего яруса

| Год и месяц исследования | В облаках | | Вне облаков | | Общее число случаев |
|--------------------------|-----------|----|--------------|--------------|---------------------|
| | Ci | Cs | под облаками | над облаками | |
| Июль-август 1958 г. | 41 | - | 5 | - | 46 |
| Май-июнь 1960 г. | 18 | 32 | 12 | 39 | 96 |
| Август-сентябрь 1960 г. | 3 | 55 | 1 | 7 | 66 |

Полеты производились только в теплую половину года, это в некоторой степени ограничивает исходные данные и лишает возможности выполнить сравнение турбулентных характеристик в облаках по полугодиям. В работе исследованы перистые и перисто-слоистые облака. На борту самолета было установлено специальное оборудование для определения скорости и направления ветра. Это позволило рассмотреть случаи полетов в облаках при малых и больших скоростях воздушного потока. В тех случаях, когда ветер измерялся не достаточно надежно (при полетах 1958 г.) использовались данные, снятые с карт барической топографии.

В облаках струйных течений исследовано 77 случаев (табл.5), в перистых и перисто-слоистых облаках соответственно 32 и 45.

Таблица 5
Количество случаев с болтанкой самолета в облаках при различной скорости воздушного потока

| Вне струйного течения | | | | В струйном течении | | | | Общее число случаев |
|-----------------------|----|----|--------------|--------------------|----|----|--------------|---------------------|
| под облаками | Ci | Cs | над облаками | под облаками | Ci | Cs | над облаками | |
| 6 | 25 | 42 | 21 | 12 | 32 | 45 | 25 | 208 |

Акселерографические записи в перисто-кучевых облаках в работе не рассматривались из-за отсутствия надежных данных.

1. Перегрузки самолетов. Перегрузки, которые испытывают современные скоростные самолеты в облаках верхнего яруса, изменяются в широких пределах - от 0,05 до 0,60 g. Известны случаи, когда максимальные значения Δn достигали 0,80g [22].

В работе приводятся средние значения перегрузок при горизонтальном полете того или иного типа самолета. Эти величины обычно характеризуют турбулизованный слой в пределах 15 000-25 000 м. Эти пределы ограничены горизонтальными размерами облака.

Перегрузки, которые испытывают современные самолеты, в облаках Ci и Cs резко различаются по величине в зависимости от скорости воздушного потока (табл.6).

Таблица 6
Повторяемость (в %) средних перегрузок самолетов
Ту-104 и Ил-18 в облаках Ci и Cs

| Форма облаков | Перегрузки Δn (в долях g) | | | | | | Число случаев |
|---------------|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| | 0,00-0,05 | 0,06-0,10 | 0,11-0,15 | 0,16-0,20 | 0,21-0,25 | 0,26-0,30 | |
| | <u>Вне струйных течений</u> | | | | | | |
| Под облаком | 33,3 | 66,7 | - | - | - | - | 6 |
| Ci | 28,0 | 52,0 | 8,0 | 12,0 | - | - | 25 |
| Cs | 9,6 | 40,4 | 35,6 | 9,6 | 4,8 | - | 42 |
| Над облаком | 61,8 | 33,4 | 4,8 | - | - | - | 21 |
| | <u>В струйном течении</u> | | | | | | |
| Под облаком | 8,3 | 33,3 | 16,7 | 41,7 | - | - | 12 |
| Ci | - | 6,2 | 21,9 | 40,6 | 21,9 | 9,4 | 32 |
| Cs | - | 13,3 | 17,8 | 24,5 | 35,5 | 8,9 | 45 |
| Над облаком | - | 16,0 | 48,0 | 28,0 | 8,0 | - | 25 |

В облаках струйных течений резко увеличивается повторяемость перегрузок со значениями 0,20 g и более. Заметим, что в перистых облаках при небольших скоростях воздушного потока такие перегрузки отсутствовали. В Cs повторяемость таких значений составляет всего 4,8%.

Сравнивая повторяемость перегрузок в перистых и перисто-слоистых облаках, необходимо указать на следующий факт. В облаках Ci повторяемость перегрузок более 0,10 g составляет 20%, а в Cs - почти 50%, т.е. в два с половиной раза больше. В случае струйных течений можно заметить обратное, т.е. здесь в облаках Ci повторяемость перегрузок более 0,15 g составляет почти 72%, а в Cs 68,9%. Анализ акселерографических записей и данные повторяемости Δn позволяют считать, что в перистых облаках при небольших скоростях ветра турбулентность менее интенсивна, чем в перисто-слоистых, а в случае струйных течений - наоборот.

Турбулентность (болтанка) вне облачного слоя при больших скоростях воздушного потока также увеличивается. В этом случае над облачным слоем C_s она более интенсивна, чем под облаками. Вне струйных течений под облаками турбулентный обмен развит сильнее, чем над облаками. Этот факт становится ясным, если учесть, что обычно верхней границей рассматриваемых облаков является слой тропопаузы.

2. Коэффициент турбулентности. Коэффициент турбулентности в облаках верхнего яруса в сильной степени зависит от скорости воздушного потока и от структуры облачного слоя. Поэтому величина K в таких облаках меняется в широких пределах. Так, например, в случае полета 18/УШ 1958 г. на $H = 10\ 000$ м в облаке C_i при скорости ветра $U = 80$ м/сек. было $K = 8,1$ м²/сек., а для случая 23/УШ 1958 г. на $H = 9450$ м в облаке C_i при $U = 160$ м/сек. было $K = 111$ м²/сек., при перегрузках, соответственно равных 0,05 и 0,25 g.

Особенно четко выявляется различие в интенсивности турбулентности, если рассмотреть повторяемость значений коэффициента турбу-

Таблица 7

Повторяемость (в %) коэффициента турбулентности в облаках C_i и C_s

| Форма облаков | Коэффициент турбулентности, м ² /сек. | | | | | | | | Число случаев |
|---------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|---------------|
| | 0,00-10,0 | 10,1-20,0 | 20,1-30,0 | 30,1-40,0 | 40,1-50,0 | 50,1-75,0 | 75,1-100,0 | 100,1-125,0 | |
| | <u>Вне струйных течений</u> | | | | | | | | |
| Под облаком | - | 83,5 | 16,5 | - | - | - | - | - | 6 |
| C_i | 12,0 | 56,0 | 20,0 | 8,0 | - | 4,0 | - | - | 25 |
| C_s | - | 31,0 | 33,3 | 11,9 | 11,9 | 7,1 | 2,4 | 2,4 | 42 |
| Над облаком | 19,0 | 57,2 | 19,0 | 4,8 | - | - | - | - | 21 |
| | <u>В струйном течении</u> | | | | | | | | |
| Под облаком | - | - | 25,0 | 41,7 | 8,3 | 25,0 | - | - | 12 |
| C_i | - | - | 6,2 | - | 21,9 | 46,9 | 21,9 | 3,1 | 32 |
| C_s | - | 2,2 | 8,9 | 15,5 | 17,8 | 31,2 | 20,0 | 4,4 | 45 |
| Над облаком | - | - | 40,0 | 44,0 | 12,0 | 4,0 | - | - | 25 |

лентности в этих формах облаков (табл. 7). При небольших скоростях ветра на уровне облаков относительно развитая турбулентность наблюдается в перисто-слоистых облаках. Повторяемость значений коэффициента 40 м²/сек. и более составляет в них 23,8% случаев, в перистых же она равна лишь 4,0%. Максимальная повторяемость коэффициента турбулентности в C_s приходится на градацию 20,1-30,0 м²/сек. и равна 33,2%. В облаках же C_i максимум повторяемости дает градация 10,1-20,0 м²/сек. Он равен 56%. Эти данные

подтверждают, что в C_s в этом случае турбулентность более интенсивна, чем в C_i .

В облаках струйных течений максимум повторяемости значений K как в C_i , так и в C_s приходится на одну и ту же градацию 50,1-75,0 м²/сек., но для C_i он равен 46,9%, для C_s - 35,4%. Анализ табл. 7 показывает, что в последнем случае в перистых облаках наблюдается более интенсивный турбулентный обмен, чем в перисто-слоистых. Отчетливо намечается сдвиг максимума повторяемости и вне облачного слоя в зависимости от скорости ветра.

Сравнение средних значений коэффициента турбулентности (табл. 8) дополняет ранее приведенные сведения о турбулентном режиме.

Таблица 8

Средние значения коэффициента турбулентности K м²/сек. в облаках C_i и C_s

| | Перистые облака | | | | Перисто-слоистые облака | | | |
|-----------------------|-----------------|----------|-------------------------|-------------|-------------------------|----------|-------------------------|-------------|
| | под облаком | в облаке | в безоблачной прослойке | над облаком | под облаком | в облаке | в безоблачной прослойке | над облаком |
| Вне струйного течения | 15 | 19 | 11 | 12 | 18 | 31 | 13 | 15 |
| В струйном течении | 46 | 66 | 22 | 36 | 28 | 60 | 21 | 31 |

Из табл. 8 видно, что вне струйного течения наименьшая интенсивность турбулентного обмена наблюдалась в безоблачных прослойках и над облаками. При больших скоростях ветра турбулентность в безоблачных прослойках возрастает примерно в два раза, но все же остается слабой по сравнению с обменом в облаках. В перистых облаках струйных течений коэффициент турбулентности увеличился более чем в три раза по сравнению с значением вне этих течений. В перисто-слоистых же облаках соответствующий рост составил примерно 1,9 раза.

Анализ полученных значений коэффициента турбулентности позволяет выявить некоторые особенности интенсивности турбулентного обмена в облаках C_i и C_s . Так, при скоростях ветра на высоте облака менее 100 км/час переход из подоблачного слоя в облако C_s почти не выявляется (табл. 9), в то же время при выходе из облака на верхней границе отмечается усиление интенсивности турбулентного обмена, а затем уменьшение ее по мере роста превращения над облачным слоем. В перистых облаках такая закономерность не обнаруживается.

В облаках струйных течений пересечение нижней и верхней границ облаков обычно сопровождается усилением турбулентного обмена (болтанки самолета) по сравнению с полетом внутри облачного слоя, что хорошо согласуется с результатами С.М. Шметера [22].

Таблица 9
Средние значения коэффициента турбулентности на
нижней и верхней границах C_i и C_s

| Вне струйных течений | | | | В струйном течении | | | |
|----------------------|---------|---------|---------|--------------------|---------|---------|---------|
| нижняя | граница | верхняя | граница | нижняя | граница | верхняя | граница |
| C_i | C_s | C_i | C_s | C_i | C_s | C_i | C_s |
| 16 | 30 | 20 | 34 | 67 | 72 | 77 | 76 |

Представляет интерес сравнение полученных данных с результатами других авторов.

Так, например, по данным П.М.Мушенко средний коэффициент турбулентности в облаках C_s *trac.* равен $30,0 \text{ м}^2/\text{сек}$. Коэффициенты турбулентности были рассчитаны П.М.Мушенко для достаточно большого числа наблюдений при отсутствии струйных течений по видимому расширению конденсационного следа за самолетом.^{1/} Нетрудно видеть, что полученные результаты находятся в хорошем согласии между собой.

3. Размеры турбулентных образований. Повторяемость различных размеров турбулентных вихрей, вызывающих перегрузки самолетов Ту-104 и Ил-18, приведена в табл.10. С увеличением скорости воздушного потока отмечается некоторое увеличение масштабов турбулентных образований, вызывающих болтанку указанных самолетов.

Так, повторяемость размеров более 500 м в облаках струйных течений C_i возросла на 34,8%, а в C_s - на 25,8%. Под облаками наблюдается также аналогичное увеличение на 8,3%, над облаками число случаев для рассматриваемых градаций примерно одинаково, поэтому существенных изменений подметить не удалось.

Средние размеры турбулентных вихрей, вызывающих болтанку Ту-104 и Ил-18 в облаках C_i и C_s , в зависимости от скорости ветра на высоте полета представлены в табл.11.

В облаках струйных течений наблюдается резкое увеличение размеров турбулентных образований.

Таким образом, в облаках верхнего яруса в теплое полугодие наблюдается достаточно хорошо выраженный турбулентный обмен. В облаках струйных течений отмечается резкое усиление интенсивности турбулентности, а также увеличение перегрузок самолета и размеров вихрей, вызывающих их болтанку. Максимальные по средним значениям коэффициенты турбулентности, зафиксированные в C_i и C_s , соответственно равны 111 и $109 \text{ м}^2/\text{сек}$.

^{1/} Конденсационные следы за самолетами (C_s *trac.*), как показала практика рейсовых полетов самолетов Ту-104 и Ил-18, по своим турбулентным характеристикам близки к перисто-слоистым облакам.

Таблица 10
Повторяемость (в%) различных размеров турбулентных вихрей, вызывающих перегрузки самолетов Ту-104 и Ил-18

| Форма облаков | Размеры турбулентных вихрей, м. | | | | | | Общее число случаев |
|---------------|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------------|
| | 200,0-300,0 | 300,1-400,0 | 400,1-500,0 | 500,1-600,0 | 600,1-700,0 | 700,1-800,0 | |
| | <u>Вне струйного течения</u> | | | | | | |
| Под облаком | - | 50,0 | 50,0 | - | - | - | 6 |
| | 8,0 | 40,0 | 40,0 | 12,0 | - | - | 25 |
| | 2,4 | 38,1 | 47,6 | 11,9 | - | - | 42 |
| Над облаком | - | 14,2 | 81,1 | 4,7 | - | - | 21 |
| | <u>В струйном течении</u> | | | | | | |
| Под облаком | - | 8,3 | 75,0 | 16,7 | - | - | 12 |
| | - | 18,8 | 84,4 | 25,0 | 21,8 | - | 32 |
| | 2,2 | 17,8 | 42,3 | 28,9 | 4,4 | 4,4 | 45 |
| Над облаком | - | 4,0 | 72,0 | 24,0 | - | - | 25 |

Таблица 11
Средние размеры турбулентных вихрей \bar{L} м, вызывающих перегрузки самолетов Ту-104 и Ил-18

| Вне струйных течений | | В струйных течениях | |
|----------------------|-------|---------------------|-------|
| C_1 | C_2 | C_1 | C_2 |
| 410 | 430 | 490 | 480 |

У1. Слоисто-дождевые, высокослоистые и высококучевые облака

Исследование облаков среднего яруса представляет определенные трудности. Это объясняется тем, что границы этих облаков часто находятся на таких уровнях, которые не представляется возможным исследовать с помощью одного самолета.

Для винтомоторных самолетов верхняя граница N_5 и N_3 очень часто находится за пределами "практического потолка" самолета. Наоборот, высота нижней границы этих облаков представляет определенные трудности для полета скоростных самолетов.

К исследованию турбулентного режима облаков N_5 , N_3 и N_2 были привлечены 193 случая акселерографических записей болтанки самолета. Районы исследования, типы самолетов и количество случаев приведены в табл. 12.

Полеты производились в теплое и холодное полугодия в различ-

Таблица 12
Количество случаев с акселерографическими записями в облаках *Ns*, *As* и *Ac*

| Географический район, год и сезон исследования | Тип самолета | В облаках | | | Вне облаков | | Общее число случаев |
|--|--------------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|---------------------|
| | | <i>Ns</i> | <i>As</i> | <i>Ac</i> | под облаком | над облаком | |
| Центральная часть ЕТС, зима, 1957-58 гг. | Ли-2 | 10 | 11 | 14 | - | - | 35 |
| Центральная часть АТС, лето, 1959 г. | Ил-14 | 5 | 8 | 5 | - | - | 18 |
| Арктика, лето-осень, 1959 г. | Ил-12 | 6 | - | - | - | - | 6 |
| Дальний Восток, Средняя Азия, весна, лето, 1960 г. | Ty-104Б | - | 9 | 6 | - | 24 | 39 |
| Северо-западная часть ЕТС, осень, 1960 г. | Ли-2 | 12 | - | 5 | 1 | - | 18 |
| Дальний Восток Средней Азии, лето-осень, 1960 г. | Ty-104Б | - | 1 | 4 | 1 | 6 | 12 |
| Северо-западная и юго-западная части ЕТС, зима, лето, весна, 1961 г. | Ли-2 | - | - | 1 | 7 | - | 8 |
| Северо-западная часть ЕТС, лето, 1962 г. | Ли-2 | 47 | 2 | - | 8 | - | 57 |

ных фронтальных облачных системах, а также и во внутримассовых облаках.

Как видно из табл.11, совместно с облаками среднего яруса в этой части работы рассматриваются и слоисто-дождевые облака. Целесообразность такого рассмотрения основана на том, что облака *Ns* и *As* очень часто представляют единый облачный массив, при этом их турбулентные характеристики оказываются близкими.

Внеоблачное пространство представлено 47 случаями, это акселерографические записи полетов под и над облаками.

1. Перегрузки самолетов. Многочисленные полеты показывают, что в облаках среднего яруса обычно наблюдается слабая и умеренная болтанка винтомоторных самолетов. Случаи сильной болтанки встречаются сравнительно редко, при этом чаще в высококучевых, чем в высокослоистых, облаках.

Средние перегрузки самолета Ли-2 в облаках *Ns*, *As* и *Ac* изменяются в пределах от 0,05 до 0,25g. Максимум повторяемости ΔП в слоисто-дождевых облаках в теплое полугодие приходится на градацию 0,11-0,15g. В холодное полугодие в *Ns* и *As*

Таблица 13

Повторяемость (в %) средних перегрузок самолета
Ли-2 в облаках N_s , A_s и $Лс$

| Форма облаков | Перегрузки Δn (в долях g) | | | | | Число случаев |
|---------------|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| | 0,00-0,05 | 0,06-0,10 | 0,11-0,15 | 0,16-0,20 | 0,21-0,25 | |
| N_s | <u>Теплое полугодие</u> | | | | | 47 |
| | 4,3 | 23,4 | 46,8 | 19,1 | 6,4 | |
| N_s | <u>Холодное полугодие</u> | | | | | 22 |
| | 4,6 | 18,2 | 45,5 | 27,1 | 4,6 | |
| A_s | - | 36,4 | 54,5 | 9,1 | - | 11 |
| $Лс$ | 15,8 | 21,0 | 15,8 | 36,9 | 10,5 | 19 |
| Под облаками | 6,3 | 31,3 | 56,1 | 6,3 | - | 16 |

максимум падает на эту же градацию.

Предварительный анализ повторяемостей показывает, что в теплое время года интенсивность турбулентного обмена в слоисто-дождевых облаках ниже, чем в холодное. Этот результат несколько противоречит существующим представлениям о механизме и интенсивности турбулентности в этих облаках. Но дело в том, что данные о перегрузках в холодное полугодие являются завышенными. Анализ материалов самолетного зондирования, а также наблюдения автора в полетах 1957-1958 гг. показывает, что в ряде случаев одновременное с N_s зондирование производилось также $Св$. В облачных системах фронтов окклюзии часто можно наблюдать, что слоисто-дождевые облака пронизаны отдельными массивами $Св$. Средние перегрузки, которые испытывали самолеты Ту-104 и Ил-18 в облаках среднего яруса, достигали до 0,21 g . Небольшое число случаев полетов в этих облаках не позволяет привести в настоящей работе их повторяемость.

Акселерографические записи показывают, что в небольшой части полетов над облачным слоем отмечается увеличение интенсивности турбулентности, а вместе с этим и перегрузок самолета. При изучении синоптической обстановки и данных ветрового зондирования оказалось, что некоторое увеличение болтанки самолетов в этом случае объясняется наличием на высоте полета сильного ветра.

Соотношение между интенсивностью турбулентного обмена в облаке и вне облачного слоя примерно такое же, как в случае облаков верхнего яруса. В те дни, когда над облаками $Лс$ наблюдались сильные ветры (струйные течения), отмечалось резкое увеличение интенсивности турбулентности.

2. Коэффициент турбулентности. В облаках N_s , A_s и $Лс$ в теплую половину года наблюдается хорошо выраженная турбулентность. Наиболее интенсивный турбулентный обмен, как видно из табл. 14,

зарегистрирован в высококучевых облаках. Повторяемость значений K более $50,0 \text{ м}^2/\text{сек.}$ составляет в них $62,5\%$. В облаках струйных течений C_1 и C_2 она равнялась соответственно $71,9$ и $55,6\%$. Это позволяет считать, что в облаках A_c турбулентный обмен

Таблица 14

Повторяемость (в %) коэффициента турбулентности в облаках N_s , A_s и A_c

| Форма облаков | Коэффициент турбулентности, $\text{м}^2/\text{сек.}$ | | | | | | | | Число случаев |
|---------------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|---------------|
| | 0,00-10,0 | 10,1-20,0 | 20,1-30,0 | 30,1-40,0 | 40,1-50,0 | 50,1-75,0 | 75,1-100,0 | 100,1-125,0 | |
| Теплое полугодие | | | | | | | | | |
| N_s | 1,9 | 7,7 | 9,6 | 19,3 | 25,0 | 25,0 | 11,5 | - | 52 |
| A_s | - | 10,0 | 10,0 | 5,0 | 20,0 | 15,0 | 40,0 | - | 20 |
| A_c | - | 6,2 | 6,3 | 12,5 | 12,5 | 25,0 | 25,0 | 12,5 | 16 |
| Холодное полугодие | | | | | | | | | |
| N_s | - | 22,7 | 13,7 | 31,8 | 22,7 | 9,1 | - | - | 22 |
| A_s | - | - | - | 63,7 | 27,2 | 9,1 | - | - | 11 |
| A_c | - | 15,8 | 5,3 | 15,8 | 15,8 | 42,0 | 5,3 | - | 19 |
| Под облаками | 5,9 | 17,7 | 23,5 | 23,5 | 29,4 | - | - | - | 17 |
| Над облаками | - | 46,7 | 26,7 | 3,3 | 10,0 | 10,0 | 3,3 | - | 30 |

по своей интенсивности близок к облакам струйных течений. Однако необходимо указать, что в работе рассмотрены только случаи с A_c , когда скорости воздушного потока на исследуемой высоте не превышали $60-80 \text{ м/сек.}$ В это время года максимум повторяемости коэффициента турбулентности в облаках A_c размыт и приходится на градации $50,1-100,0 \text{ м}^2/\text{сек.}$ В высокостроистых облаках максимум повторяемости выражен четко и падает на градацию $75,1-100,0 \text{ м}^2/\text{сек.}$ Наиболее слабая турбулентность среди рассматриваемых форм наблюдается в слоисто-дождевых облаках.

В холодную половину года для всех форм максимум повторяемости коэффициента турбулентности сдвинут в сторону меньших градаций, хотя турбулентность в облаках и остается достаточно интенсивной. Вне облаков также отмечается хорошо выраженная турбулентность.

Дополнительное представление об интенсивности турбулентного обмена в облаках N_s , A_s и A_c дает средние значения K в разные полугодия (табл.15).

В теплую половину года во всех облаках коэффициент турбулентности примерно в $1,3-1,4$ раза больше, чем в холодное полугодие. В арктических районах в слоисто-дождевых облаках интенсивность турбулентности летом в два раза меньше, чем зимой, что вполне естественно, если учесть синоптические условия формирования этих облаков.

Таблица 15

Средние значения коэффициента турбулентности
в облаках N_s , A_s и A_c

| Полу- годие | Слоисто-дождевые облака | | Высокослоистые облака | | | Высококучевые облака | | | Число случаев |
|------------------|-------------------------|----------|-----------------------|----------|-------------|----------------------|----------|-------------|---------------|
| | под облаком | в облаке | над облаком | в облаке | над облаком | под облаком | в облаке | над облаком | |
| Теплое | 21 | 46 | 44 | 58 | 18 | 36 | 63 | 27 | 129 |
| Холодное | - | 34 | 40 | 42 | - | 37 | 46 | - | 58 |
| Теплое (Арктика) | - | 23 | - | - | - | - | - | - | 6 |

В холодную часть года в слоисто-дождевых облаках интенсивность турбулентного обмена наиболее правильно характеризуется значением $K = 30 \text{ м}^2/\text{сек}$. (здесь случаи зондирования $N_s - C_b$ исключены).

В безоблачных прослойках, наблюдавшихся в облаках N_s , A_s и A_c обычно отмечается ослабление турбулентного обмена. Средние значения коэффициента K здесь соответственно равны 12, 13 и $16 \text{ м}^2/\text{сек}$.

3. Размеры турбулентных вихрей. Турбулентные вихри, которые вызывают болтанку самолетов Ли-2 и Ту-104 в рассматриваемых облаках, можно определить пределами от 70 до 460 м. Средние значения их приводятся в табл.16.

Таблица 16

Средние размеры турбулентных вихрей, вызывающие болтанку самолетов Ли-2 и Ту-104 в облаках N_s , A_s и A_c

| Тип самолета | Слоисто-дождевые облака | | Высокослоистые облака | | | Высококучевые облака | | |
|--------------|-------------------------|----------|-----------------------|----------|-------------|----------------------|----------|-------------|
| | под облаком | в облаке | под облаком | в облаке | над облаком | под облаком | в облаке | над облаком |
| Ли-2 | 80 | 90 | 80 | 100 | - | 80 | 100 | - |
| Ту-104 | - | - | - | 380 | 420 | - | 400 | 460 |

В облаках среднего яруса размеры вихрей, вызывающих болтанку Ли-2, оказались одинаковыми, несколько меньшими были размеры в слоисто-дождевых облаках. В случае Ту-104 отмечается разница между A_s и A_c , в последнем случае вихри по своим размерам больше. Для самолета Ту-104 турбулентные образования по своим размерам больше в 3,8-4,0 раза. Заметим, что соотношение аэродинамических коэффициентов для этих самолетов равно примерно 4,0.

Итак, в облаках N_s , A_s и A_c наблюдается хорошо выраженный турбулентный обмен, интенсивность которого меняется в зави-

сности от сезона, синоптических условий формирования облаков, а также от географического района. Максимальные значения коэффициентов турбулентности, полученные в этих формах облачности, равны в № 92,5 м²/сек. летом и 66,5 м²/сек. зимой, в № 89,3 и 62,4 м²/сек. и в № - 108,9 и 79,3 м²/сек. В безоблачных прослойках интенсивность турбулентного обмена уменьшается примерно в 4-5 раз.

В высококучевых облаках в течение всего года турбулентность остается наиболее интенсивной по сравнению со всеми ранее рассмотренными формами облаков, исключая лишь облака струйных течений. Сильный ветер над высококучевыми, а иногда и высокослоистыми облаками приводит к увеличению интенсивности турбулентного обмена по сравнению с турбулентностью в подоблачном слое.

IV. Слоистые и слоисто-кучевые облака

Относительно низкое расположение этих облаков и большая их горизонтальная протяженность способствуют тщательному их изучению с помощью самолетов и вертолетов.

В настоящее время создана теория образования слоистообразных облаков [14], в которой существенная роль отводится вертикальным токам и турбулентному обмену.

Исследованию слоистых и слоисто-кучевых облаков посвящены работы [1,4, 13 и 19]. Эти облака наиболее изучены по сравнению с другими формами облаков. Турбулентность в St и Sc также изучалась многими авторами [1,4, 19 и 20]. Так, в работе М.П. Чуриновой [20] приводятся значения коэффициента турбулентности в слоистых и слоисто-кучевых облаках, полученные по материалам ветрового и самолетного зондирования.

Л.Т. Матвеев и В.С. Кожарин [13] рассмотрели уровни турбулентной энергии в облаках. Они установили, что в облаках St и Sc наблюдается турбулентность, усиленная по сравнению с безоблачной атмосферой. Коэффициенты турбулентности, рассчитанные Л.Т. Матвеевым [4] для облаков Арктики, подтверждают теоретические положения работы [14].

Несмотря на наличие указанных работ, сведения о турбулентном обмене в облаках нижнего яруса являются далеко еще не полными. Поэтому целесообразно снова вернуться к турбулентным характеристикам этих облаков. Для изучения турбулентного режима в слоистых и слоисто-кучевых облаках в настоящей работе использовано 303 акселерографические записи болтанки самолетов Ли-2 и Ил-12^{1/}. Распределение случаев в зависимости от формы облаков, времени года и района исследования представлено в табл. 17. 75% всех слу-

^{1/} Акселерографические записи болтанки самолета в облаках арктических районов и некоторые результаты их обработки были любезно предоставлены профессором Л.Т. Матвеевым.

чаев относятся к полетам в облаках и только 25% - к полетам вне облаков. К случаям слоистых облаков отнесены также полеты в тумане арктических районов в 1959 г. (9 случаев). Для теплого полугодия рассмотрено 195, а для холодного 108 случаев. Если исключить полеты в арктических широтах, то для теплого полугодия рассмотрено лишь 49 случаев, из них 35 в облаках.

Таблица 17
Количество случаев с болтанкой самолетов Ил-12 и Ли-2 в облаках St и Sc

| Географический район | Теплое полугодие | | | | Холодное полугодие | | | | Число случаев |
|----------------------|------------------|----|----|-------------|--------------------|----|----|-------------|---------------|
| | под облаком | St | Sc | над облаком | под облаком | St | Sc | над облаком | |
| Умеренные широты | 9 | 8 | 27 | 5 | 8 | 55 | 30 | 15 | 157 |
| Арктика | 33 | 81 | 26 | 6 | - | - | - | - | 146 |
| Всего случаев | 42 | 89 | 53 | 11 | 8 | 55 | 30 | 15 | 303 |

1. Перегрузки самолета. Средние перегрузки самолетов Ил-12 и Ли-2 в теплое и холодное полугодия в облаках St и Sc заметно различаются (табл.18).

В теплое время года в слоистых облаках максимум повторяемости перегрузок Ли-2 приходится на градацию 0,11-0,15 g и достигает 50%, в холодное же полугодие максимум сдвинут на более низкую градацию 0,06-0,10 g. Повторяемость значений Δn 0,21 g и более в St в теплую половину на 10,3% больше. Данные табл.18 показывают, что в слоистых облаках намечается существенное различие в интенсивности турбулентности для разных полугодий. Такого же различия для слоисто-кучевых облаков из этой таблицы установить не удается. Однако, если рассмотреть только внутримассовую облачность Sc (в работе этого раздела не сделано из-за небольшого числа случаев), то вновь намечается хорошо выраженное различие такого же характера, как и в случае слоистых облаков. Акселерографические записи, а также визуальные наблюдения бортаэрологов и автора, позволяют утверждать, что в облаках St и Sc, которые связаны с фронтами (в особенности с холодными), турбулентный обмен выражен более ярко, чем во внутримассовых облаках.

Инверсия (или изотермия) над облаками приводит к резкому ослаблению турбулентности, а вместе с этим к уменьшению перегрузок, испытываемых самолетом. Над облаками средние перегрузки самолета Ли-2 более 0,10 g в рассмотренных материалах не зафиксированы. В то же время под облачным слоем они представляют основную часть повторяемости Δn для обоих полугодий.

Турбулентность (болтанка) в тумане и облаках St - Sc арктических районов развита слабо, максимум повторяемости для всех рассмотренных случаев приходится на значения $\Delta n = 0,05 g$.

Таблица 18
Повторяемость (в %) средних перегрузок самолетов
Ил-12 и Ли-2 в облаках St и Sc

| Форма облаков | Перегрузки Δn (в долях g) | | | | | | Число случаев |
|---------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| | 0,00-0,05 | 0,06-0,10 | 0,11-0,15 | 0,16-0,20 | 0,21-0,25 | 0,26-0,30 | |
| | <u>Теплое полугодие</u> | | | | | | |
| Под облаками | - | 44,4 | 55,6 | - | - | - | 9 |
| St | - | - | 50,0 | 37,5 | 12,5 | - | 8 |
| Sc | 3,7 | 18,5 | 22,2 | 37,1 | 18,5 | - | 27 |
| Над облаками | - | 100,0 | - | - | - | - | 5 |
| | <u>Холодное полугодие</u> | | | | | | |
| Под облаками | - | 50,0 | 50,0 | - | - | - | 8 |
| St | 1,8 | 41,8 | 32,8 | 21,8 | 1,8 | - | 55 |
| Sc | 3,3 | 23,4 | 16,7 | 33,3 | 20,0 | 3,3 | 30 |
| Над облаками | 40,0 | 60,0 | - | - | - | - | 15 |
| | <u>Теплое полугодие (Арктика) (Ил-12)</u> | | | | | | |
| Под облаками | 51,5 | 48,5 | - | - | - | - | 33 |
| Туман | 100,0 | - | - | - | - | - | 9 |
| St | 77,8 | 22,2 | - | - | - | - | 72 |
| Sc | 73,1 | 26,9 | - | - | - | - | 26 |
| Над облаками | 83,3 | 16,7 | - | - | - | - | 6 |

Анализ акселерографических записей показывает, что на границах слоистых и слоисто-кучевых облаков наблюдается более интенсивная болтанка, чем в облачном слое. Особенно следует указать на интенсивность болтанки на верхней границе облаков St - Sc, где перегрузки достигают относительно больших размеров по сравнению с нижней кромкой и самим облачным слоем.

2. Коэффициент турбулентности. Повторяемость значений коэффициента турбулентности, рассчитанных по рассмотренным ранее перегрузкам, приведена в табл.19.

В теплую половину года в слоистых и слоисто-кучевых облаках отмечается увеличение интенсивности турбулентного обмена по сравнению с холодным временем года. Из табл.19 видно, что повторяемость больших градаций коэффициента турбулентности резко возрастает по сравнению с более низкими градациями. Так, например, повторяемость значений K более $40 \text{ м}^2/\text{сек.}$ для теплого полугодия в слоистых облаках увеличилась на 31,6%, а в слоисто-кучевых на 25%, при этом в Sc в 7,4% случаев были $K = 75 \text{ м}^2/\text{сек.}$

Максимум повторяемости коэффициента турбулентности в облаках St - Sc арктических районов приходится на градацию $20,1-30,0 \frac{\text{м}^2}{\text{сек.}}$ Он оказался сдвинутым в сторону низких значений по сравнению со значениями K в теплое и холодное полугодие в умеренных широтах.

Таблица 19

Повторяемость (в %) коэффициента турбулентности
в облаках St и Sc

| Форма облаков | Коэффициент турбулентности, м ² /сек. | | | | | | | Число случаев |
|---------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|---------------|
| | 0,0-10,0 | 10,1-20,0 | 20,1-30,0 | 30,1-40,0 | 40,1-50,0 | 50,1-75,0 | 75,1-100,0 | |
| | <u>Теплое полугодие</u> | | | | | | | |
| Под облаками | - | - | 55,6 | 33,1 | 11,1 | - | - | 9 |
| St | - | - | 12,5 | 25,0 | 50,0 | 12,5 | - | 8 |
| Sc | - | - | 7,4 | 11,0 | 37,1 | 37,1 | 7,4 | 27 |
| Над облаками | - | 80,0 | 20,0 | - | - | - | - | 5 |
| | <u>Холодное полугодие</u> | | | | | | | |
| Под облаками | - | 25,0 | 50,0 | 25,0 | - | - | - | 8 |
| St | - | 16,4 | 23,6 | 29,1 | 23,6 | 7,3 | - | 55 |
| Sc | - | 13,4 | 10,0 | 20,0 | 33,3 | 20,0 | 3,3 | 30 |
| Над облаками | - | 73,5 | 26,5 | - | - | - | - | 15 |
| | <u>Теплое полугодие (Арктика)</u> | | | | | | | |
| Под облаками | - | 24,2 | 39,4 | 27,3 | 9,1 | - | - | 33 |
| Туман | 22,2 | 66,7 | 11,1 | - | - | - | - | 9 |
| St | 5,6 | 38,8 | 41,7 | 9,7 | 2,8 | 1,4 | - | 72 |
| Sc | 3,8 | 19,2 | 46,3 | 26,9 | - | 3,8 | - | 26 |
| Над облаками | - | 83,5 | 16,5 | - | - | - | - | 6 |

Повторяемость разных значений коэффициента турбулентности в облаках St - Sc в зависимости от географического района и полугодия представлена графически на рис.3. Из рис.3 видно, что в слоистых и слоисто-кучевых облаках наиболее интенсивная турбулентность наблюдается в теплое время года. Максимум кривой лежит в пределах 40-50 м²/сек. и составляет около 32% случаев. В холодное время года он лежит в этих же пределах, но составляет 27% случаев. В облаках St - Sc арктических районов максимум кривой повторяемости сдвинут левее в сторону низких градаций и находится в пределах 20-30 м²/сек.

Характеристику интенсивности обмена в облаках St и Sc дополняют данные о средних значениях коэффициента турбулентности (табл.20). Анализ данных, помещенных в табл.20, указывает на хорошо выраженные различия интенсивности обмена в зависимости от формы облаков и времени года. В рассматриваемых облаках, в особенности на их верхних границах, отмечается определенное увеличение обмена. Так, например, по средним данным для теплого времени года в Sc коэффициент турбулентности на верхней границе увеличился на 15,7% по сравнению с холодным полугодием. На нижней границе усиление обмена выражено менее ярко. В холодное полугодие в St и Sc на верхней границе рост величины K соответственно равен 3 и 22%. Однако в отдельных случаях на нижней

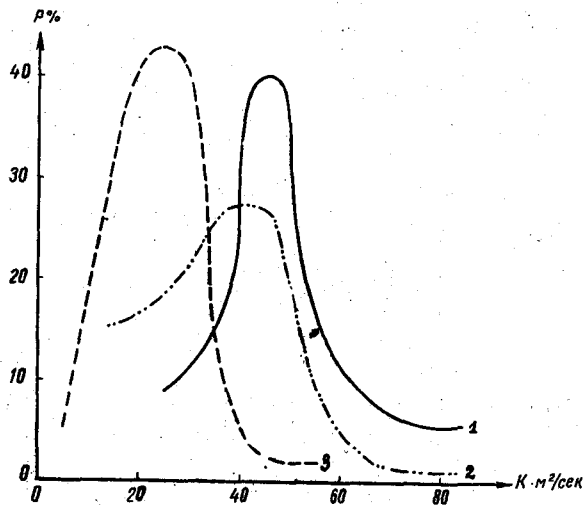


Рис.3. ПОВТОРЯЕМОСТЬ (в %) КОЭФФИЦИЕНТА ТУРБУЛЕНТНОСТИ В СЛОИСТООБРАЗНЫХ ОБЛАКАХ ДЛЯ РАЗНЫХ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ РАЙОНОВ:

- 1 - умеренные широты (теплое полугодие),
- 2 - умеренные широты (холодное полугодие),
- 3 - Арктика (теплое полугодие).

Таблица 20

Средние значения коэффициента турбулентности в облаках St и Sc

| Полуго- дие | Слоистые облака | | | Слоисто-куче- вые облака | | | На границах облаков | | | |
|----------------|---------------------|------------------|---------------------|-----------------------------|------------------|---------------------|------------------------|----|---------|----|
| | над обла- ком | в обла- ке | над обла- ком | под обла- ком | в обла- ке | над обла- ком | нижняя | | верхняя | |
| | | | | | | | St | Sc | St | Sc |
| Теплое | 28 | 39 | 15 | 32 | 51 | 19 | - | 52 | - | 59 |
| Холодное | 23 | 33 | 16 | 26 | 40 | 17 | 31 | 40 | 34 | 49 |

и верхней кромках облаков отмечается более интенсивная турбулентность, чем это следует из данных табл.20. Средние значения коэффициента турбулентности в облаках St и Sc арктических районов здесь не приводятся, так как они опубликованы в работе Л.Т.Матвеева [4]. В тумане K составляет 14 м²/сек.

3. Размеры турбулентных вихрей. Турбулентные вихри, которые вызывают болтанку самолета Ли-2 в облаках нижнего яруса, изменяются в относительно небольших пределах - от 60 до 140 м.

Средние их размеры приведены в табл.21.

Анализ данных табл.21 показывает, что средние размеры \bar{L} в слоистых облаках в теплую половину года меньше, чем в слоисто-кучевых облаках. В холодную половину года размеры вихрей оказались одинаковыми.

Над облачным слоем размеры вихрей в течение года для слоистых облаков остаются постоянными, в то же время над слоисто-кучевыми отмечается небольшой рост размеров турбулентных образований. Этот

Таблица 21
Средние размеры турбулентных вихрей, вызывающих
болтанку самолета Ли-2

| Полугодие | Слоистые облака | | | Слоисто-кучевые облака | | |
|-----------|-----------------|----------|-------------|------------------------|----------|-------------|
| | под облаком | в облаке | над облаком | под облаком | в облаке | над облаком |
| Теплое | 90 | 100 | 80 | 90 | 110 | 80 |
| Холодное | 80 | 90 | 80 | 80 | 90 | 90 |

интересный факт, по мнению автора, должен быть исследован на более обширном материале.

Итак, в слоистых и слоисто-кучевых облаках по сравнению с внеоблачным пространством наблюдается усиленная турбулентность, наиболее интенсивная в теплое полугодие и менее развита в холодную часть года. В слоисто-кучевых облаках коэффициент турбулентности больше, чем в слоистых. Вне облаков турбулентность более развита под облачным массивом и несколько слабее над облачным слоем.

Анализ исходных материалов указывает на существенное различие турбулентного обмена на верхней и нижней границах облаков. Если рассмотреть интенсивность болтанки самолета при переходе из подоблачного слоя в облако, то для слоистых облаков различие почти не обнаруживается, а для слоисто-кучевых наблюдается увеличение интенсивности турбулентности. Иная картина наблюдается при выходе из облака или полете по самой верхней кромке облаков, в тех и других облаках при этом отмечается резкое увеличение турбулентного обмена, в особенности в слоисто-кучевых облаках.

Рассмотрение времени суток, в которые производился каждый полет, раскрывает еще одну особенность турбулентного обмена в слоистых и слоисто-кучевых облаках. В S_c в любое время года наблюдается хорошо выраженный суточный ход коэффициента турбулентности (табл.22).^{1/}

Таблица 22
Средние значения коэффициента турбулентности в
слоисто-кучевых облаках в зависимости от времени
суток

| Время суток | Теплое полугодие | Холодное полугодие |
|---------------------|------------------|--------------------|
| Первая половина дня | 54,3 | 42,1 |
| Вторая половина дня | 47,9 | 34,2 |

Данные табл.22 показывают, что в первую половину дня в облаке коэффициенты турбулентности больше, чем во вторую часть дня. Это

^{1/} Под первой половиной дня имеется в виду время до 14 час. 00 мин.

позволяет считать, что турбулентный обмен в облаках достигает максимального развития после полудня и уменьшается во второй половине дня.

У. Кучевые и кучево-дождевые облака

Среди большого многообразия облаков, наблюдающихся в свободной атмосфере, наиболее сложным объектом для изучения являются облака вертикального развития. Большая вертикальная мощность этих облаков, интенсивные конвективные и турбулентные движения резко ограничивают возможности использования самолета для исследования кучевых и в особенности кучево-дождевых облаков. Перегрузки, которые испытывают самолеты при полете в этих облаках, настолько велики, что полет часто становится небезопасным. Так, по данным С.М. Шметера [23], в верхней части кучево-дождевых облаков приращение перегрузки самолета Ту-104 может достигать $\pm 1,0 g$, а иногда и больше. Несмотря на эти трудности, в настоящее время в Гос.НИИГВФ, ЦАО, ГГО, ЛГМИ и других учреждениях собран обширный материал по изучению упорядоченных движений и турбулентности в кучевых и кучево-дождевых облаках.

По материалам научно-исследовательских полетов выполнен ряд работ [5, 19, 23, 26 и 27], в которых исследованы конвективные движения, интенсивность и распределение турбулентных зон внутри и за пределами облака, а также зависимость турбулентного обмена от стадии развития облака.

В настоящей работе использованы акселерографические записи болтанки самолетов в указанных облаках при горизонтальном их пересечении. При этом следует заметить, что для исследования были взяты лишь случаи пролета самолета над наковальной и в отдельных случаях в нижних и верхних частях кучево-дождевых облаков.

Средние части кучево-дождевых облаков в работе не рассматриваются.

Всего рассмотрено 185 случаев, из них 154 случая в облаках и 31 вне облачного массива (под и над облаками). Основная часть полетов производилась в теплое время года над континентом и только в 15 случаях в Арктике. Для холодного времени года были исследованы 16 случаев над ЕТС (табл.23). Большая вертикальная мощность облаков, а также применявшаяся методика исследования не позволили провести изучение Св с помощью одного самолета. Обычно верхняя часть облаков обследовалась скоростными самолетами, а низкие облака и нижняя часть Св - винтомоторными.

Исходный материал не лишен некоторых недостатков, связанных с методикой исследования и ограничениями в производстве полетов в облаках вертикального развития. Поэтому результаты исследования носят ориентировочный характер, а полученные количественные характеристики турбулентного обмена являются несколько заниженными. Несмотря на это, можно полагать, что полученные в работе сведения

Таблица 23

Количество горизонтальных площадок пересечений,
на которых регистрировалась турбулентность в обла-
ках

| Географический район, год и сезон исследования | Тип самолета | В облаках | | Вне облаков | | Общее число случаев |
|---|------------------|-----------|----|-------------|-------------|---------------------|
| | | Си | Св | под облаком | над облаком | |
| Арктика, лето, 1957 г. | Ил-12 | 11 | - | 3 | 1 | 15 |
| Центральная часть ЕТС, зима, 1957-58 гг. | Ли-2 | 1 | 5 | - | - | 6 |
| Центральная часть ЕТС, Средняя Азия, лето, 1958 г. | Ту-104 | 1 | 2 | - | - | 3 |
| Центральная часть АТС, лето, 1959 г. | Ил-14 | 8 | - | - | - | 8 |
| Дальний Восток, Средняя Азия, весна-лето, 1960 г. | Ту-104Б Ил-18 | 4 | 1 | - | 8 | 13 |
| Дальний Восток, Средняя Азия, лето-осень, 1960 г. | Ту-104Б | 1 | 29 | - | 13 | 43 |
| Северо-западная и юго-западная части ЕТС, зима-лето 1961 г. | Ли-2 | 17 | 4 | 6 | - | 27 |
| Северо-западная часть ЕТС, лето, 1962 г. | Ли-2 | 50 | 20 | - | - | 70 |

о турбулентном режиме указанных облаков будут все же представлять некоторый интерес, поскольку в литературе таких сведений практически не имеется.

1. Перегрузки самолетов. Многочисленные исследования [5, 19, 23, 26 и 30] показывают, что наиболее опасным для современных самолетов является полет в кучево-дождевых облаках, так как в этих облаках наблюдаются перегрузки, которые по своим значениям близки к критическим величинам.

Однако повышенная турбулентность, а следовательно, и большие перегрузки самолетов могут наблюдаться и в кучевых облаках. Определяющим фактором в этом случае является стадия развития облака. Так, например, по данным автора, летом в *Си med* наблюдались случаи, когда перегрузка самолета Ли-2 на высоте 2300 м была близка к единице. Данные о перегрузках современных самолетов, приводимые в настоящей работе, являются средними и могут быть в три-четыре раза меньшими, чем их максимальные значения.

Ниже отдельно рассмотрены низкие и высокие кучевые облака, как это рекомендуется в работах [19] и [23]. Основой такого деления является расположение облаков по высоте. В настоящей работе такое деление является удобным в связи с ограниченностью потол-

ка полета винтомоторных самолетов.

Низкие кучевые облака. К этому случаю отнесены полеты в облаках *Ci hum.*, *Ci med.*, а также частично в *Cb*. Отнесение кучево-дождевых облаков в эту группу связано с тем, что на этих высотах ^{1/} они часто очень близки по своим характеристикам к кучевым облакам. Повторяемость средних перегрузок самолетов Ли-2 и Ил-12 в облаках *Ci - Cb* приведена в табл.24.

Таблица 24

Повторяемость (в %) средних перегрузок самолетов Ли-2 (ЕТС) и Ил-12 (Арктика) в облаках *Ci - Cb*

| Форма облаков | Перегрузки Δn (в долях g) | | | | | | Число случаев |
|----------------|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| | 0,00-0,05 | 0,06-0,10 | 0,11-0,15 | 0,16-0,20 | 0,21-0,25 | 0,26-0,30 | |
| <i>Ci - Cb</i> | <u>Теплое полугодие</u> | | | | | | 82 |
| | - | - | 12,2 | 32,9 | 43,9 | 11,0 | |
| <i>Ci - Cb</i> | <u>Холодное полугодие</u> | | | | | | 15 |
| | - | - | 13,4 | 53,2 | 20,0 | 12,4 | |
| <i>Ci</i> | <u>Теплое полугодие (Арктика)</u> | | | | | | 11 |
| | 63,6 | 36,4 | - | - | - | - | |

Из таблицы видно, что в теплое время года турбулентность в облаках вертикального развития резко возрастает по сравнению с холодной частью года. Повторяемость средних перегрузок самолета Ли-2 более 0,20 g в теплый сезон достигает почти 55%, в холодное же полугодие она составляет 33%.

Сравнивая данные о перегрузках в умеренных широтах и в Арктике, можно заметить, что в последнем случае турбулентный обмен в рассматриваемых облаках развит слабо.

Отдельные данные о перегрузках под и над облаками свидетельствуют о том, что вне облаков, в особенности над кучевыми облаками, турбулентность не достигает значительной интенсивности.

Высокие кучевые облака. Диапазон изменения перегрузок здесь примерно такой же, как и в низких облаках, но в данном случае исследования производились на более тяжелых скоростных самолетах и поэтому данные, помещенные в табл.25, указывают на довольно сильно развитую турбулентность.

Данные табл.25 показывают, что в случае высоких кучевых облаков повторяемость перегрузок более 0,20 g достигает 68,4%, это дает возможность считать турбулентный обмен в этих облаках более интенсивной по сравнению с формами, лежащими на более низких уровнях. Если выделить отдельно повторяемость перегрузок в кучево-дождевых

^{1/} Здесь имеются в виду высоты порядка 2000-3000 м.

Таблица 25
Повторяемость (в %) средних значений перегрузок
самолета Ту-104 в облаках $C_{II}-C_{\Sigma}$ в теплое
полугодие

| Форма облаков | Перегрузка Δn (в долях g) | | | | | Число случаев |
|--------------------------|--------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 0,06- 0,10 | 0,11- 0,15 | 0,16- 0,20 | 0,21- 0,25 | 0,26- 0,30 | |
| Над облаками | - | 14,3 | 80,9 | 4,8 | - | 21 |
| $C_{II} - C_{\Sigma}$ | 2,6 | 2,6 | 26,4 | 39,4 | 29,0 | 38 |
| В том числе C_{Σ} | - | 3,1 | 25,0 | 37,5 | 34,4 | 32 |

облаках, как это сделано в таблице, то повторяемость больших градаций возрастает.

Рассматривая отдельные значения перегрузок в кучево-дождевых облаках, находящихся в разной стадии развития (стадии роста и диссипации), можно заметить ослабление турбулентности в $C_{\Sigma} inc.$ по сравнению с $C_{\Sigma} calv.$ К таким же выводам пришел С.М.Шметер [23] по данным непосредственных наблюдений за болтанкой самолета Ту-104 в этих облаках.

Над облаками турбулентность слабее, чем в облаках, и она ослабевает по мере увеличения превышения исследуемого слоя над облачным массивом.

2. Коэффициент турбулентности. Если при рассмотрении перегрузок сравнение турбулентного обмена в низких и высоких облаках было недостаточно полным, то этот пробел можно восполнить, если рассмотреть коэффициент турбулентности. Повторяемость коэффициента турбулентности в облаках вертикального развития приводится в табл.26. Таблица 26 не подтверждает высказанного ранее предположения о более интенсивном турбулентном обмене в высоких кучевых облаках по сравнению с низкими.

Приводимые средние значения коэффициента турбулентности хорошо дополняют приведенные выше данные о зависимости интенсивности обмена от времени года. Для холодного времени года значения K осреднены только для низких кучевых облаков, так как для высоких облаков такие данные отсутствовали.

Рассмотрение данных о стадии развития того или иного облака позволяет получить ориентировочные средние значения коэффициента турбулентности в облаках $C_{\Sigma} calv.$ и $C_{\Sigma} inc.$ Эти значения равны соответственно 76 и 64 м²/сек.

Сравнение значений K для разных географических районов, в частности для районов Арктики, показывает, что турбулентный обмен в облаках $C_{II} - C_{\Sigma}$ в умеренных широтах почти в два с половиной раза интенсивнее. Этот результат подтверждает влияние подстилающей поверхности (ее термического режима) на интенсивность турбулентного обмена в облаках.

В теплое полугодие отмечается резкий рост интенсивности тур-

булентного обмена в облаках вертикального развития по сравнению с ее интенсивностью в холодное время года. Повторяемость значений коэффициента турбулентности, превышающих $75 \text{ м}^2/\text{сек.}$, возрастает более чем в два раза, хотя максимум кривой повторяемости остается в тех же пределах, что и в холодное полугодие. Турбулентный обмен в кучевых облаках арктических районов развит слабо.

Таблица 26

Повторяемость (в %) коэффициента турбулентности в облаках $C_u - C_b$

| Форма облаков | Коэффициент турбулентности, $\text{м}^2/\text{сек.}$ | | | | | | | Общее число случаев |
|-----------------|--|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|---------------------|
| | 20,0-30,0 | 30,1-40,0 | 40,1-50,0 | 50,1-75,0 | 75,1-100,0 | 100,1-125,0 | 125,1-150,0 | |
| | <u>Теплое полугодие</u> | | | | | | | |
| Низкие | - | 3,3 | 8,9 | 32,2 | 41,2 | 13,8 | 1,1 | 90 |
| Высокие | 2,6 | 2,6 | 13,1 | 50,1 | 23,7 | 7,9 | - | 38 |
| Под $C_u - C_b$ | - | 20,0 | - | 80,0 | - | - | - | 5 |
| $C_u - C_b$ | 0,8 | 3,1 | 10,1 | 37,6 | 35,9 | 11,7 | 0,8 | 128 |
| Над $C_u - C_b$ | 19,1 | 38,0 | 23,8 | 19,1 | - | - | - | 21 |
| | <u>Холодное полугодие</u> | | | | | | | |
| $C_u - C_b$ | - | - | 13,4 | 59,9 | 20,0 | 6,7 | - | 15 |
| | <u>Теплое полугодие (Арктика)</u> | | | | | | | |
| C_u | 63,7 | 27,2 | - | 9,1 | - | - | - | 11 |

Значения коэффициентов турбулентности здесь невелики. Максимум кривой повторяемости приходится на градацию $20-30 \text{ м}^2/\text{сек.}$ Максимальная повторяемость K над облаками приходится на градацию $30-40 \text{ м}^2/\text{сек.}$ Под облачным слоем турбулентность оказалась интенсивнее, чем над облаками.

Некоторым дополнением к этим результатам являются средние величины коэффициенты турбулентности в облаках (табл. 27).

Таблица 27 показывает, что средние коэффициенты турбулентности в облаках $C_u - C_b$ в умеренных широтах почти в два с половиной раза больше, чем в арктических районах. Следует заметить, что значения коэффициента турбулентности в Арктике, как это следует по данным наблюдений, взаимствованным из бортовых журналов, в основном относятся к облакам C_u и med .

3. Размеры турбулентных вихрей. Средние размеры турбулентных образований Ил-12 и Ли-2 представлены в табл. 28.

Данные табл. 28 показывают, что с увеличением удельной нагрузки самолетов отмечается и увеличение размеров турбулентных вихрей, вызывающих болтанку самолетов.

В холодное полугодие характерные размеры турбулентных образований, которые вызывают болтанку самолетов, уменьшаются (самолет Ли-2).

Таблица 27

Средние значения коэффициента турбулентности в облаках вертикального развития

| Полугодие | Под облаками | С _и -С _в | Над облаками |
|------------------|--------------|--------------------------------|--------------|
| Теплое | 57 | 74 | 37 |
| Холодное | 37 | 65 | - |
| Теплое (Арктика) | 25 | 32 | - |

Таким образом, турбулентный обмен в облаках вертикального развития во все сезоны года развит значительно сильнее, чем в других формах облаков (рис.4). В кучевых облаках отдельные значения коэффициента обмена превышают $125 \text{ м}^2/\text{сек.}$, а повторяемость значений величины $K \gg 100 \text{ м}^2/\text{сек.}$ достигает почти 13%.

Таблица 28

Средние размеры турбулентных вихрей, вызывающих болтанку самолетов в облаках С_и - С_в

| Форма облаков | Ту-104 | Ил-14 | Ил-12 | Ли-2 |
|--------------------------------|---------------------------|-------|-------|------|
| | <u>Теплое полугодие</u> | | | |
| Под облаками | - | - | 120 | 120 |
| С _и -С _в | 440 | 140 | 130 | 120 |
| Над облаками | 400 | - | - | - |
| | <u>Холодное полугодие</u> | | | |
| Под облаками | - | - | - | 100 |
| С _и -С _в | - | - | - | 110 |

Отсутствие исследований в центральной части кучево-дождевого облака не позволяет дать определенной оценки интенсивности турбулентного обмена таких облаков, хотя есть основание считать, что коэффициенты турбулентности там могут достигать значения $200 \text{ м}^2/\text{сек.}$ и более.

У1. Турбулентный обмен в атмосфере

К исследованию турбулентного обмена в атмосфере привлечены материалы полетов Гос.НИИ ГВФ, ААНИИ и ГГО. Для удобства анализа исходные данные разбиты на три группы, соответствующие слоям атмосферы 0-2, 2-8 и 8-12 км. Такое деление на слои связано с физическими процессами, обуславливающими обмен в том или ином слое. Распределение рассмотренных случаев по географическим районам и слоям представлено в табл.29.

Из 231 случая, приведенного в табл.29, более 50% относится к самому нижнему слою атмосферы и только 87 случаев - к более высоким слоям.

Таблица 29
Количество случаев с акселерографическими записями
в зависимости от географического района и слоя ат-
мосферы

| Географичес- кие районы | Высота , км | | | | | Общее число случаев |
|--|-------------|-----|--------------------|------|---------------------|---------------------------|
| | < 2 | 2-8 | 2-8 ^{1/2} | 8-12 | 8-12 ^{1/2} | |
| Умеренные широты (теплое полугодие) | 32 | 17 | - | 8 | 9 | 66 |
| Умеренные широты (холодное полугодие) | 21 | 16 | 14 | 16 | 5 | 72 |
| Арктика (теплое полугодие) | 91 | 2 | - | - | - | 93 |
| Всего случаев по слоям | 144 | 35 | 14 | 24 | 14 | 231 |

69% проанализированных случаев характеризуют турбулентность в теплое полугодие в умеренных и арктических широтах, остальные случаи относятся к холодной части года и к умеренным широтам.

Повторяемость коэффициента турбулентности по слоям и географическим районам приведена в табл.30.

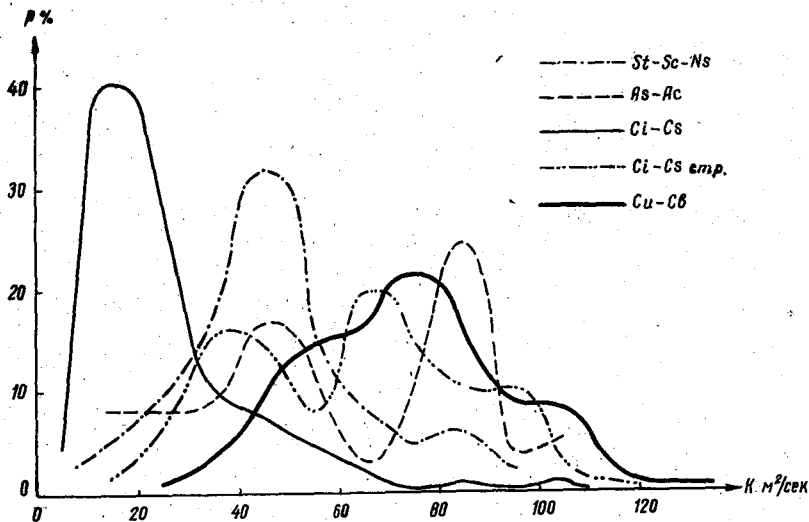


Рис.4. ПОВТОРЯЕМОСТЬ (в %) КОЭФФИЦИЕНТА ТУРБУ-
ЛЕНТНОСТИ В ОБЛАКАХ НИЖНЕГО, СРЕДНЕГО, ВЕРХНЕГО ЯРУСОВ
И ВЕРТИКАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ ДЛЯ ТЕПЛОГО ПОЛУГОДИЯ.

Таблица 30 показывает, что наиболее интенсивная турбулентность в оба полугодия наблюдается в нижнем слое атмосферы. В

^{1/} Случаи, когда наблюдались большие скорости воздушных потоков (струйные течения).

Таблица 30
Повторяемость (в %) коэффициента турбулентности в атмосфере

| Слой атмосферы, км | Коэффициент турбулентности, м ² /сек. | | | | | | | | | Число случаев |
|--------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|---------------|
| | <10 | 10,1-20,0 | 20,1-30,0 | 30,1-40,0 | 40,1-50,0 | 50,1-75,0 | 75,1-100,0 | 100,1-125,0 | 125,1-150,0 | |
| | Теплое полугодие | | | | | | | | | |
| <2,0 | - | 21,8 | 68,8 | 9,4 | - | - | - | - | - | 32 |
| <2,0 ^{1/} | 1,1 | 36,3 | 45,1 | 16,4 | 1,1 | - | - | - | - | 91 |
| 2-8 | - | 64,7 | 11,7 | 5,9 | 17,7 | - | - | - | - | 17 |
| 8-12 | - | 62,5 | 25,0 | 12,5 | - | - | - | - | - | 8 |
| 8-12 ^{1/} | - | - | - | - | 22,2 | 55,6 | 22,2 | - | - | 9 |
| | Холодное полугодие | | | | | | | | | |
| <2 | 4,8 | 52,4 | 19,0 | 14,3 | 9,5 | - | - | - | - | 21 |
| 2-8 | 50,0 | 16,6 | - | 11,2 | 16,6 | 5,6 | - | - | - | 18 |
| 2-8 ^{1/} | - | - | - | 16,7 | 41,7 | 33,3 | 8,3 | - | - | 12 |
| 8-12 | 87,5 | 12,5 | - | - | - | - | - | - | - | 16 |
| 8-12 ^{1/} | - | - | - | 20,0 | 20,0 | 40,0 | 20,0 | - | - | 5 |

тех случаях, когда в верхней тропосфере и нижней стратосфере наблюдаются большие скорости воздушного потока, турбулентность в этих слоях резко усиливается и максимум повторяемости сдвигается в сторону более высоких градаций величины К. В этом случае он находится в пределах 40,1-75,0 м²/сек.

В Арктике существенного различия интенсивности турбулентности по сравнению с умеренными широтами не обнаруживается.

Представляется интересным рассмотреть средние значения коэффициента турбулентности по слоям атмосферы в зависимости от времени года, географического района и скорости воздушного потока (табл.31).

Из табл.31 следует, что существенного различия в средних значениях коэффициента обмена в слоях < 2 и 2-8 км для обоих полугодий не наблюдается. В верхней тропосфере и нижней стратосфере отмечается значительное ослабление интенсивности обмена, в особенности в холодное полугодие. С увеличением скорости ветра возрастают и средние коэффициенты турбулентности. Так, в слое 2-8 км (холодное полугодие) К = 52 м²/сек., а в слое 8-12 км средняя величина К увеличилась в 10 раз и равна 60 м²/сек.

В Арктике интенсивность обмена в нижнем слое атмосферы оказалась примерно такой же, как и в умеренных широтах. Однако этот

1/ Рассматриваются случаи с большими скоростями воздушного потока (струйные течения).

2/ Рассматриваются случаи, относящиеся к арктическим широтам.

Таблица 31

Средние значения коэффициента турбулентности по слоям атмосферы в зависимости от географического района и скорости воздушного потока

| Географический район | Слой атмосферы, км | | | | |
|---------------------------------------|--------------------|-----|------------------|------|-------------------|
| | < 2 | 2-8 | 2-8 ^v | 8-12 | 8-12 ^v |
| Умеренные широты (теплое полугодие) | 24 | 22 | - | 18 | 61 |
| Умеренные широты (холодное полугодие) | 22 | 20 | 52 | 6 | 60 |
| Арктика (теплое полугодие) | 23 | 27 | - | - | - |

результат, по-видимому, не вполне правильно отражает фактическую картину.

В заключение следует указать, что полученные характеристики турбулентного обмена в атмосфере следует считать ориентировочными. Недостаточное количество рассмотренных случаев для нижнего слоя атмосферы не позволяет сделать каких-либо определенных выводов, в особенности для холодного полугодия. Для выяснения особенностей обмена в атмосфере требуется тщательное исследование на более обширном материале, чем это сделано в настоящей работе. Такое исследование выходит за пределы поставленной здесь задачи.

Итак, в работе дана оценка интенсивности обмена в основных формах облаков и в атмосфере. Сводная таблица средних величин коэффициента турбулентности в зависимости от формы облака, времени года и слоя атмосферы (табл.32) была бы неполной, если бы в ней не были представлены максимальные значения этого коэффициента. Сравнение средних и максимальных величин показывает, что в отдельных случаях, например, в перистых облаках среднее значение исследуемой величины оказывается более чем в три раза меньше максимальной.

Представляет определенный интерес сравнение результатов, полученных в работе, с данными других авторов.

Таблица 32 показывает, что средние величины коэффициента турбулентности, вычисленные в настоящей работе, оказались большими, чем величины, вычисленные М.П.Чуриновой [20], но меньшими, чем полученные Н.З.Пинусом и В.Д.Литвиновой [16]. Одной из возможных причин расхождения является то, что для расчета коэффициента турбулентности М.П.Чуриновой и в настоящей работе использованы различные методы [11 и 8]. Другая причина, и может быть основная, - качество и методика получения исходных данных. Однако следует указать, что средние величины коэффициента обмена, полученные в данной работе и в [16] на достаточно большом исходном

Таблица 32

Средние и максимальные значения коэффициента турбулентности в
облаках и внеоблачном пространстве

| Исходные данные | Верхний ярус | | | | Средний ярус | | Нижний ярус | | | | Облака верт. развития | Внеоблачное пространство км | | | | |
|--|--------------|-----|------------------|------------------|-----------------|-----|-------------|----|----|---------------------|--------------------------|--------------------------------|-----|-------------------|------|--------------------|
| | Ci | Cs | Ci ^{1/} | Cs ^{1/} | Ac | As | Ns | Sc | St | туман ^{2/} | Cu - Cb | < 2 | 2-8 | 2-8 ^{1/} | 8-12 | 8-12 ^{1/} |
| <u>Теплое полугодие</u> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| По данным М.П.Чуриновой | - | - | - | - | - | - | - | 28 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| По данным Н.З.Пинуса и Д.Л.Литвино- вой | - | - | 227 | - | 98 | 111 | 54 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| По данным автора (средн.) | 19 | 31 | 66 | 60 | 63 | 58 | 46 | 51 | 39 | 14 | 74 | 24 | 22 | - | 18 | 61 |
| По данным автора (макс.) | 39 | 101 | 111 | 109 | 109 | 89 | 92 | 88 | 54 | 18 | 145 | 35 | 42 | - | 34 | 85 |
| <u>Холодное полугодие</u> | | | | | | | | | | | | | | | | |
| По данным М.П.Чуриновой | - | - | - | - | - | - | 18 | 21 | 21 | - | - | 18 | - | - | - | - |
| По данным автора (средн.) | - | - | - | - | 46 | 43 | 34 | 40 | 40 | - | 65 | 22 | 20 | 52 | 6 | 60 |
| По данным автора (макс.) | - | - | - | - | 79 | 62 | 66 | 85 | 56 | - | 113 | 38 | 55 | 76 | 14 | 96 |

1/ Случаи с большими скоростями воздушного потока (струйные течения).

2/ Арктические широты.

материале, для пограничного слоя оказались близкими и соответственно равны 18 и 22 м²/сек. Этот факт в некоторой степени делает реальными рассмотренные предположения.

Относительно небольшое число случаев, использованных в работе [16] для определения коэффициента турбулентности в облаках, а также привлечение более широкого спектра турбулентных вихрей затрудняет сравнение величин, представленных в табл.32.

Таким образом, в рассмотренных формах облаков в течение всего года наблюдается хорошо выраженная турбулентность, обычно усиливающаяся в теплую половину года. Сравнение обмена в облачных слоях и вне облаков позволяет утверждать, что более интенсивна турбулентность в облаках. Обычно значения K в облаках оказываются в 1,5-2,0 раза больше, чем над облаками.

В безоблачных прослойках обмен развит слабо, коэффициенты турбулентности в этих случаях лежат в пределах 10-15 м²/сек., а большие значения K встречаются довольно редко.

Результаты расчета коэффициента обмена показывают, что в облаках и внеоблачном пространстве отмечается резкое усиление обмена при больших скоростях воздушного потока. K повышению интенсивности турбулентности приводят также и отдельные мезоуструи, наблюдающиеся в свободной атмосфере.

Данные акселерографических записей болтанки самолета и результаты расчета коэффициента турбулентности показывают, что у большинства из рассмотренных форм облаков на верхней границе отмечается резкое увеличение интенсивности турбулентного обмена. На нижней же границе такое усиление отмечается не всегда.

Следует считать, что в основной части случаев (за исключением облаков струйных течений) под облачным слоем турбулентность развита сильнее, чем над облаками. Это факт является одновременно подтверждением теории образования облаков.

В отношении турбулентности во фронтальных облачных системах и во внутримассовых облаках следует указать, что в первом случае она развита более значительно.

Сравнение значений коэффициента турбулентности в равное время суток показывает, что обычно во второй половине дня турбулентность ослабевает. Особенно хорошо это прослеживается по акселерографическим записям болтанки самолетов в слоистых и слоисто-кучевых облаках.

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить благодарность старшему научному сотруднику ГГО А.С.Дубову, консультациями и советами которого он пользовался, и доценту А.М.Баранову, принявшему участие в обсуждении рукописи.

Баранов

Л и т е р а т у р а

1. А б р а м о в и ч К.Г. Характеристика турбулентности атмосферы в дни с низкой облачностью. Метеорология и гидрология, № 9, 1958.
2. Б а р а н о в А.М. Облака верхнего яруса и условия полета в них. Гидрометеиздат, Л., 1960.
3. В е р о н ц о в П.А. Аэрологические исследования пограничного слоя атмосферы. Гидрометеиздат, 1960.
4. В о с к р е с е н с к и й А.И. и М а т в е е в Л.Т. Водность и турбулентный режим слоистообразных облаков Арктики. Метеорология и гидрология, № 11, 1960.
5. В у л ь ф с о н Н.И. Исследование конвективных движений в свободной атмосфере. Изд. АН СССР, М., 1961.
6. Г е р м а н М.А., М а з у р и н Н.И., С о л о н и н С.В. К вопросу об условиях полетов в перистых облаках. Труды ЛГМИ, вып.12, 1961.
7. Д у б о в А.С. К вопросу определения вертикальных скоростей ветра по данным самолетного акселерографа. Труды ГГО, вып. 81, 1959.
8. Д у б о в А.С. Определение коэффициента турбулентного обмена по ускорению самолета. Труды ГГО, вып.98, 1959.
9. З а й ц е в В.А. и Л е д о х о в и ч А.А. Приборы и методика исследования облаков с самолета. Гидрометеиздат, Л., 1960.
10. К у р м л о в а Ю.В. Исследование струйных течений в Центральной аэрологической обсерватории. Труды ЦАО, вып.26, 1959.
11. Л а й х т м а н Д.Л. Новый метод определения коэффициента турбулентной вязкости в пограничном слое атмосферы. Труды ГГО, вып.37 (99), 1952.
12. Л а й х т м а н Д.Л., Ш н а й д м а н В.А. Критерии установившейся турбулентности в струйных течениях. Метеорология и гидрология, № 12, 1960.
13. М а т в е е в Л.Т., К о ж а р и н В.С. Роль турбулентного перемешивания в формировании структуры слоистообразных обла-

14. М а т в е е в Л.Т. ков. Изв.АН СССР, сер.геофиз., № 11, 1956.
Некоторые вопросы теории образования и эволюции слоистообразной облачности. Вопросы физики облаков и туманов. Труды ААНИИ, т.228, вып.1, 1959.
15. М а т в е е в Л.Т. Структурная функция вертикальной скорости воздушного потока и новый способ расчета коэффициента турбулентности в свободной атмосфере. Труды ГГО, вып.78, 1958.
16. П и н у с Н.З. и Л и т в и н о в а В.Д. Об интенсивности турбулентности в облаках. Изв. АН СССР, сер.географ., № 1, 1962.
17. П и н у с Н.З. Современное состояние вопроса о турбулентности атмосферы, вызывающей болтанку самолетов. Труды ЦАО, вып.34, 1960.
18. Р е ш е т о в Г.Д. Облачность в верхней тропосфере. Труды ЦИПа, вып.81, 1961.
- ✓ 19. "Физика облаков" под ред.А.Х.Х р г и а н а . Гидрометеиздат, Л., 1961.
20. Ч у р и н о в а М.П. Некоторые характеристики турбулентности в дни со слоистыми облаками. Труды ГГО, вып.54 (116), 1955.
21. Ш в е ц М.Е. О конденсации водяного пара в атмосфере. Изв.АН СССР, сер.геофиз., № 6, 1955.
22. Ш м е т е р С.М. Турбулентность в облаках верхней тропосферы. Труды ЦАО, вып.34,1960.
- ✓ 23. Ш м е т е р С.М. Высокие кучевые облака. Труды ЦАО, вып.35, 1960.
24. Ш у р Г.Н. Метод и приборы для получения некоторых характеристик турбулентности атмосферы с самолета. Труды ЦАО, вып.24, 1958.
25. Ю р г е н с о н А.Н. Исследование структуры турбулентных движений, вызывающих болтанку современных самолетов. Метеорология и гидрология, № 10, 1960.
- ✓ 26. Аскегман В., Turbulence around tropical cumuli. J. Meteorol., v. 15., N I , 1958.

27. Andersen W., Turbulence in cb, Flight, v.65, N 2366, 1954.
28. Best. A., Effect of turbulence and condensation on drop-size distribution in cloud., J.Roy. Met. Soc. 78, 1952
29. Shaefer V., Cloud forms in the jet streams, Tellus, v.I N 5. 1953.