

# ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ ПО ВЕЛИЧИНЕ ВЕСОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ И ДИСПЕРСНОСТИ КАПЕЛЬ ВОДЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СТЕНДОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИМИТАЦИИ ПОПАДАНИЯ ДОЖДЯ



ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова:

**Борис Михайлович Клинский**, начальник отдела, д.т.н.

**Авенир Васильевич Кудрявцев**, ведущий научный сотрудник, к.т.н.

**В** настоящее время известно несколько нормативных документов, в которых регламентируются требования к экспериментальной проверке влияния капельной влаги в виде дождя на работоспособность и характеристики авиационных ГТД.

В авиационных правилах Часть 33 "Нормы летной годности двигателей воздушных судов", 2004 г. (АП-33) стандартные атмосферные концентрации воды при дожде, принятые при сертификации в АП-33, представлены в табл. 1.

| Высота, м | СВД, гр. воды/м <sup>3</sup> воздуха |
|-----------|--------------------------------------|
| (0)       | 20,0                                 |
| 6100      | 20,0                                 |
| 8000      | 15,2                                 |
| 10000     | 10,8                                 |
| 12000     | 7,7                                  |
| 14000     | 5,2                                  |

Здесь СВД - процентное содержание воды в воздухе по массе. Оно составляет 1,63 % при  $H = 0$  м, 3,063 % при  $H = 6100$  м, 2,28 % при  $H = 14000$  м. Таким образом, максимальное удельное

весовое содержание воды в воздухе согласно АП-33 достигает 3 % при  $H = 6100$  м, а минимальное 1,63 % при  $H = 0$  м.

Стандартное атмосферное распределение капель дождя, принятое при сертификации согласно АП-33 приведено в табл. 2.

| Диаметр капель дождя, мм | Всего |
|--------------------------|-------|
| 0...0,49                 | 0     |
| 0,50...0,99              | 2,25  |
| 1,00...1,49              | 8,75  |
| 1,50...1,99              | 16,25 |
| 2,00...2,49              | 19,00 |
| 2,50...2,99              | 17,75 |
| 3,00...3,49              | 13,50 |
| 3,50...3,99              | 9,50  |
| 4,00...4,49              | 6,00  |
| 4,50...4,99              | 3,00  |
| 5,00...5,49              | 2,00  |
| 5,50...5,99              | 1,25  |
| 6,00...6,49              | 0,50  |
| 6,50...7,00              | 0,25  |
| Всего                    | 100   |

Медианный диаметр капель дождя согласно табл. 2 - 2,66 мм. Таким образом, согласно АП-33 максимальный размер капель дождя составляет 7,00 мм.

В "Certification Specifications for Engines CSE Amendment 2, 18 December 2009" (European Aviation Safety Agency) требования к условиям проведения сертификации ГТД ГА в условиях имитации дождя полностью совпадают с требованиями, изложенными в АП-33.

В MIL, регламентирующим требования по испытаниям ГТД ВА, даны соответствующие требования в разделе "Попадание атмосферной воды" на вход в ГТД. Стандарт регламентирует: "При работе двигателя на режиме полной форсажной тяги на вход в двигатель должна быть введена смесь с концентрацией воды в жидкой и паровой фазе в количестве 2, 3,5 и 5 % от полного массового расхода воздуха и 50 % воды, вводимой через специальные форсунки на 1/3 входной площади нижнего сегмента". Двигатель должен проработать в этих условиях в течение 5 минут. Описанная ниже процедура должна быть повторена при работе двигателя на режиме малого газа".

Стандарт MIL применяется в странах НАТО и ряде других стран при сертификации военных ГТД.

Максимальная концентрация жидкой фазы в воздухе согласно MIL достигает 5 % (напомню: по АП-33 - 3,063 %).

Важно также отметить, что стандарт MIL в отличие от АП-33 не регламентирует требования к размеру водяных капель.

В РИАТ (Руководство по эксплуатации авиационной техники) содержатся требования по проверке работоспособности ГТД при попадании на вход воды. Руководство регламентирует: "Система подачи воды на вход в двигатель должна обеспечивать равномерный распыл воды по всей площади входа с размером капель, по

возможности соответствующим принятому в расчете диаметру капель". Таким образом, РИАТ не определяет конкретные значения по величине дисперсности распыла водяных капель, а распределение капель по размерам в потоке считается равномерным. В РИАТ также нет заданных в явном виде значений концентрации жидкой фазы в воздухе при проверке работоспособности ГТД на попадание воды на вход. С этой целью оценим максимальную величину весовой концентрации жидкой фазы в воздухе. Максимальная интенсивность дождя в РИАТ для ливневого дождя регламентируется как  $q = 0,0000833$  м/сек или 5 мм/мин. На единицу площади в единицу времени во время дождя выпадает следующее количество воды

$$g_{\text{вод}} = q \cdot \gamma_{\text{вод}} = 0,0000833 \cdot 1000 = 0,0833 \text{ кг/м}^2 \text{ с}$$

где:

$q$  - интенсивность дождя, м/сек;

$\gamma_{\text{вод}}$  - удельная масса дождевой воды, кг/м<sup>3</sup>.

Количество воды, приходящееся на единицу объема воздуха при дожде (в кг/м<sup>3</sup>), составляет  $g_{\text{вод}}$ , где  $W$  - скорость падения капель воды при дожде, м/с.

При ливневом дожде РИАТ рекомендует считать  $W = 7$  м/с.

В этом случае

$$g_{\text{вод}} = 0,0833 / 7 = 0,0119 \text{ кг/м}^3.$$

Таким образом, для условий  $H = 0$ ,  $M = 0$  ( $\rho = 1,225$  кг/м<sup>3</sup>) концентрация массы дождевой воды составляет 0,00971, т.е. примерно 1 %.

Из сравнения четырех вышеуказанных нормативных документов следует, что максимальное значение концентрации воды в виде дождя регламентирует MIL (до 5 %), промежуточное значение до 3 % указано в АП-33 и минимальное значение концентрации воды примерно 1 % задано в РИАТ.

Рассмотрим ниже поведение капель дождя в спокойной атмосфере и при их попадании в поток воздуха.

Капля дождя, образованная в спокойной атмосфере, под действием сил тяжести движется с некоторым ускорением до тех пор, пока вес капли не уравновесится силой ее аэродинамического сопротивления. Дальше капля движется с постоянной скоростью, так называемой скоростью витания капли. Если скорость витания меньше некоторой определенной величины, капля сохраняет свой размер. Если больше, то она распадается на более мелкие капли.

Согласно [1] "Дождь - жидкие водяные осадки, состоящие из капель радиусом более 0,25 мм". Наблюдения, представленные в [1], показывают, что капли воды радиусом больше 2,5...3,2 мм не встречаются в атмосфере - они сплюсциваются и разбиваются на более мелкие (рис. 1).

Согласно [1] для капель радиусом от 4,25 до 6,25 мм, падающих в спокойном воздухе, число брызг колебалось от 3 до 97, наиболее часто образовывалось 30 - 40 брызг. Преобладающий радиус брызг составлял 0,75...1 мм. (скорость падения капель дождя достигает 8...10 м/с).

Определим условия определяющие дробление капель дождя в спокойной атмосфере.

Принимая, что коэффициент сопротивления капли можно записать, следуя [2], в виде

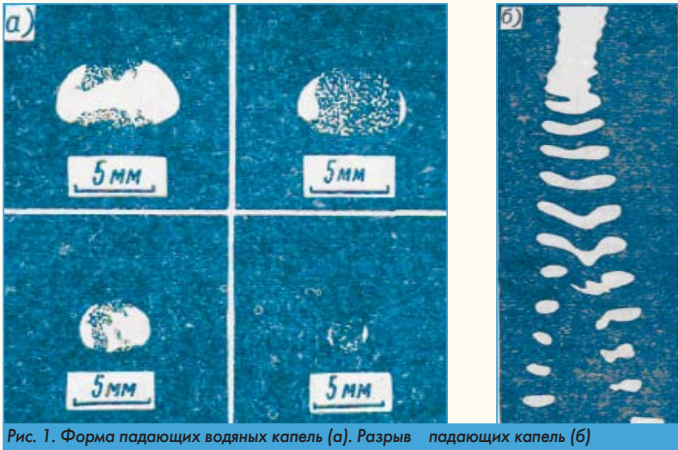


Рис. 1. Форма падающих водяных капель (а). Разрыв падающих капель (б)

$$C_x = a/(Re)^{0,5},$$

получим выражение для определения скорости падения (витания) капли в неподвижной газовой среде

$$U_v = (4/3a)^{2/3} \cdot d_1^* \cdot ((\rho_1/\rho_2)^{2/3} \cdot (g^2/\nu))^{0,333}.$$

Здесь:

$d_1$  - диаметр капли жидкости,

$\rho_1$  - плотность жидкости,

$\rho_2$  - плотность газа,

$g$  - ускорение сил тяжести,

$\nu$  - кинематическая вязкость газовой среды.

Скорость, при которой наступит дробление капли, определяется соотношением между силами поверхностного натяжения и аэродинамическими силами, то есть величиной критерия:

$$W_e = \rho_2 \cdot U^2 \cdot d_1 / \sigma_1,$$

где  $\sigma_1$  - коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Как показано в [4] при  $W_e = 10,7$  происходит раздвоение капли, а при  $W_e \geq 14$  - ее дробление.

Отсюда следует, что величина критической скорости движения капли в неподвижном воздухе, при которой начинается ее распад, равна:

$$U_{кр} = (10,7 \cdot \sigma_1 / \rho_2 \cdot d_1)^{0,5}.$$

Из графика следует, что в спокойной атмосфере капли дождя крупнее  $d = 5$  мм существовать не могут, так как для  $d \geq 5$  мм скорость витания становится больше критической скорости, и крупные капли должны раздробиться на рой более мелких капель.

Рассмотрим теперь, как поведут себя капли дождя, попадая на вход двигателя.

Попадая в поток воздуха, поступающего в двигатель, капли приобретают относительную скорость движения, величина которой определяется скоростью потока воздуха на входе в двигатель, то есть режимом работы двигателя. Дальнейшее поведение капли определяется относительной скоростью ее движения и диаметром капли, т.е. критерием Вебера [3, 4, 5], и соотношением между временем увлечения капли потоком и временем ее распада.

Время деформации и распада капли при [6, 7] в зависимости от относительной скорости ее движения показано на рис. 3.

Как показано в [3, 4], если величина критерия  $W_e$  определенно по начальной относительной скорости, остается меньше  $W_e = 10,7$ , капля сохраняет свой размер, то есть капля увлекается потоком раньше чем успеет разрушиться.

В противном случае капли распадаются на более мелкие капли (при  $10,7 \leq W_e \leq 14$  капли раздваиваются, при  $W_e \geq 14$  капля распадается на рой более мелких капель [5]).

Как следует из представленного графика при относительной скорости движения капли  $U_{отн} = 120$  м/с время разрушения капли составляет всего 0,5 мс. За это время капля продвинется в пространстве не более чем на 60 мм, т.е. можно считать, что крупная капля вначале распадается на рой более мелких капель, а потом эти мелкие капли попадут на вход в двигатель.

В земных условиях ( $P = 100$  кПа,  $T = 293$  К) согласно представленных данных, попадая в поток воздуха, поступающего в двигатель со скоростью  $U = 50$  м/с (по скорости потока режим близкий

к "малому газу"), все капли диаметром  $d \geq 0,25$  мм распадутся на рой более мелких капель.

Капли, размер которых  $d \leq 0,25$  мм, сохраняют свой размер после увлечения их потоком воздуха.

На максимальных режимах работы ГД величина относительной скорости движения капли воды может достигать 150 м/с. В этих условиях максимальный размер капель не превысит  $d = 0,04$  мм даже с учетом их возможной коагуляции.

Таким образом, на лопатки вентилятора при работе двигателя в условиях дождя должна натекает двухфазная смесь, размер капель в которой существенно меньше размеров дождевых капель. Максимальный размер капель на входе в двигатель после их вторичного дробления не может превышать 250 мкм.

Полученные результаты показывают, что "стандартное атмосферное распределение по размеру капель дождя, принятое при сертификации" согласно АП-33 не соответствует фактическому распределению капель как при их свободном падении в атмосфере, так и при движении в потоке воздуха во входных стендовых или самолетных каналах перед входом в ГД.

Размер капель воды на входе в ГД при его работе в момент выпадения атмосферных осадков в зависимости от режима работы ГД не должен превышать 0,25 мм, в то время как в АП-33 величина медианного диаметра капель дождя составляет 2,66 мм.

При натекании двухфазной смеси на препятствие (лопатку вентилятора) только относительно мелкие водяные капли ( $d \leq 5$  мкм) будут следовать линиям тока потока воздуха [7, 8]. Более крупные капли из-за своей инерции осадут на стенках лопатки, образуя на ней пленку жидкости.

Оценочные расчеты осаждения капель жидкости на препятствии при обтекании его двухфазным потоком показали, что доля капель, осевших на стенках лопатки вентилятора, существенным образом зависит их размера (рис.4). Так все капли, размер которых превышает  $d = 50$  мкм, должны осесть на стенках препятствия.

По мере уменьшения диаметра капль величина  $\Omega$  уменьшается и для капль диаметром  $d = 5$  мкм составляет всего 0,1.

Так как основная масса воды в потоке содержится в каплях медианного размера, который даже с учетом вторичного дробления исходных капль лежит в пределах  $100 \leq d \leq 200$  мкм, то можно ожидать, что при дозвуковых скоростях полета самолета практически вся вода содержащееся в воздухе осадет на лопатках вентилятора.

В приложении "В" к АП-33 дано по-

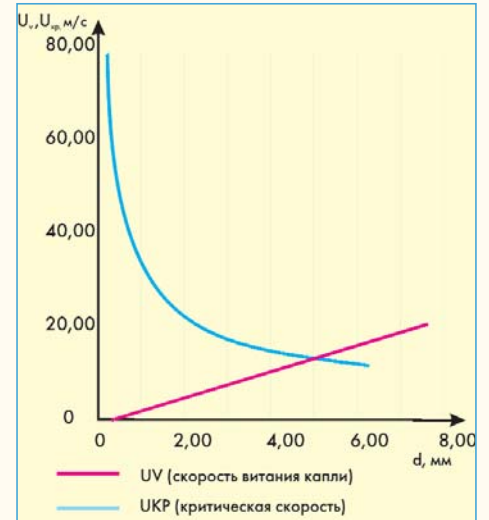


Рис.2. Зависимость скорости витания капли воды и критической скорости движения от диаметра капли воды.

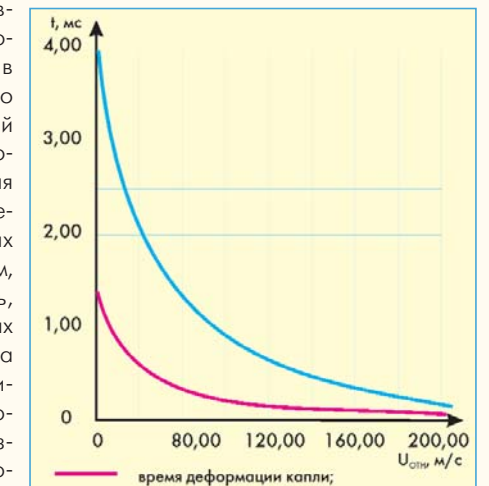


Рис. 3. Зависимость времени деформации и полного разрушения капли от скорости потока ( $P=100$  кПа,  $T=293$  К,  $W=14$ )

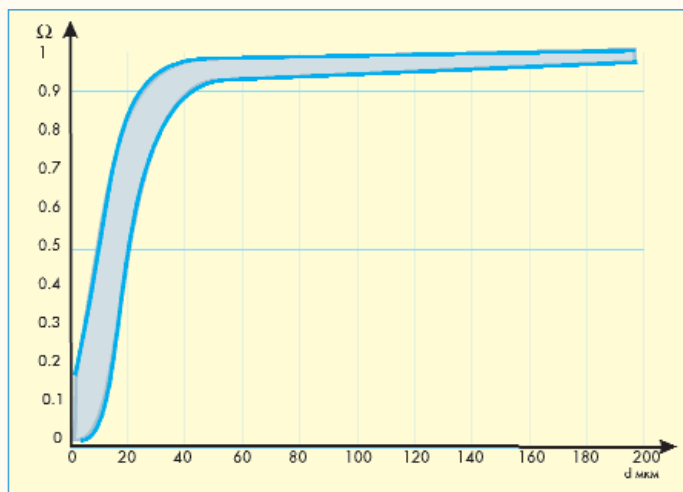


Рис. 4. Доля капель данного размера ( $\Omega$ ), осаждающихся на стенках лопатки вентилятора при обтекании ее двухфазным потоком, в зависимости от размера капель.

яснение: "При проведении испытаний (обычно путем впрыска воды для имитации условий при дожде и путем забрасывания градин, полученных из льда, для имитации условий при граде) допустимо применение капель воды и града, имеющих форму, размер и распределение по размерам, отличающиеся от тех, которые указаны в Приложении В, если Заявитель покажет, что эта замена не приводит к ослаблению требований, предъявляемых к этим испытаниям". Поэтому полученный результат по оценке рекомендуемых размеров капель воды в потоке воздуха на входе в двигатель не противоречит нормам АП-33 в связи с тем, что в обоих случаях основная часть капельной влаги будет сепарироваться на входных рабочих лопатках вентилятора ПД (рис. 5).

При сверхзвуковых скоростях полета самолета максимальный размер капель дождя после прохождения их через скачок уплотнения не превышает  $d = 20$  мкм [9].

Это должно привести к существенному уменьшению доли воды осаждающейся на лопатках. Тем более, если будем учитывать степень испарения мелких капель за скачком уплотнения.

Изменение степени испарения воды в двухфазной смеси по времени рассчитаем по методике, изложенной в [10].

На рис. 5 представлены данные по испарению капель воды в двухфазной смеси, медианный размер капель в которой составляет  $d = 20$  мкм, в зависимости от температуры воздуха за скачком уплотнения.

Таким образом, можно ожидать, что при сверхзвуковых скоростях полета попадание воды в двигатель при дожде практически не окажет заметного влияния на работу вентилятора и компрессора. А скажется, в основном, на процессе горения топлива в камере сгорания за счет изменения величины суммарного коэффициента избытка воздуха, определяемой автоматикой двигателя.

При дозвуковых скоростях полета практически вся вода, содержащаяся в воздухе в виде капель, из-за инерционного характера движения капель осядет на лопатках вентилятора и образует на них жидкую пленку.

Вода, содержащаяся в виде жидкой пленки на лопатках, частич-

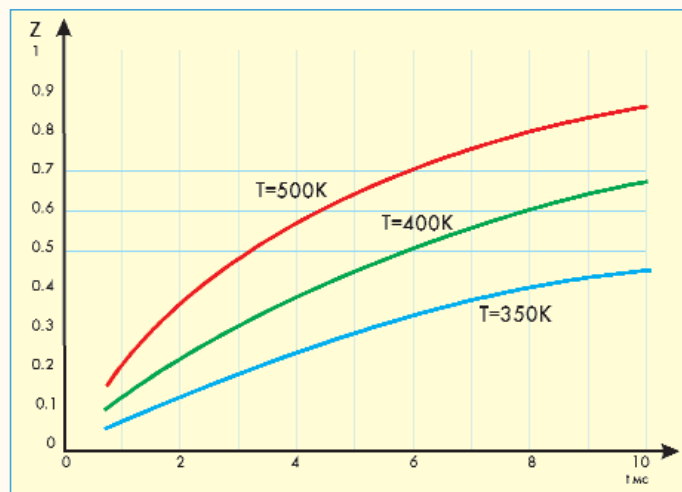


Рис. 5. Изменение степени испарения воды в потоке воздуха по времени для различных температур воздуха, (медианный размер капель в двухфазной смеси  $d = 10$  мкм)

но отбрасывается на статор вентилятора двигателя, а также частично распыливается потоком воздуха с задней кромки лопатки.

Соотношение расходов воды отброшенных в кольцевой зазор и распыленных с задней кромки лопатки должно определяется частотой вращения ротора вентилятора двигателя и равномерностью толщины пленки по длине лопатки, то есть режимом работы двигателя и распределением капель воды в воздухе.

Во всех рассмотренных выше нормативных документах за исключением РИАТ отсутствуют требования к химическому составу дождевой воды. В РИАТ в качестве рабочего тела допускается использовать дистиллированную воду и воду-конденсат.

#### Литература

1. Матвеев Л.Т. Курс метеорологии (Физика атмосферы). "Гидрометеиздат", Л, 1976 г.
2. Вырубов Д.Н. Смесеобразование в двигателях Дизеля. "Машгиз", М, 1954 г.
3. Волынский М.С. О дроблении капель жидкости в потоке воздуха. Д.А.Н. АН СССР 1948 г., т. 62, №3, с. 301-304.
4. Волынский М.С. О дроблении капель потоком воздуха. Д.А.Н. АН СССР Новая серия, 1949, т. 18 №3.
5. Дитякин Ю.Ф., Клячко Л.А. и др. Распыливание жидкостей. "Машиностроение", М, 1977 г.
6. Раушенбах Б.В. и др. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. "Машиностроение", М, 1964 г., с.63.
7. Ильяшенко С.М., Талантов А.В. Тория и расчет прямоточных камер сгорания. "Машиностроение", М., 1964 г.
8. Гельфанд Б.Е. и др. Особенности разрушения капли вязкой жидкости в ударных волнах. ИФЖ 1973 г., т. 25, №3, с.58-61.
9. Гельфанд Б.Е., Губин С.А., Когарко С.М. Разновидности дробления капель в ударных волнах и их характеристики. ИФЖ, 1994 г., т.27, №1, с. 111-111.
10. Франк-Каменецкий Д.А., Диффузия и теплопередача в химической кинетике. "Наука", М., 1967 г.

Связь с автором: clinskiy@ciam.ru

## ИНФОРМАЦИЯ

9 июня 2012 года в Перми завершена сборка и успешно осуществлен первый запуск двигателя-демонстратора технологий.

Комментируя это событие генеральный конструктор ОАО "Авиадвигатель" Александр Иноземцев сказал: "Прошло четыре года с момента старта Проекта "Двигатели для самолета МС-21" и начала финансирования Программы создания семейства двигателей для перспективных ближне-среднемагистральных самолетов. Разработка дви-

гателей пятого поколения на базе унифицированного газогенератора осуществляется в соответствии с федеральной целевой Программой, основная цель которой - завоевание не менее 10 % мирового рынка авиадвигателей в классе тяг от 9 до 18 тс. Базовый двигатель нового семейства - ПД-14.

За последние 25 лет в нашей стране не создавалось продукта, подобного ПД-14 по уровню новизны технологий проектирования, изготовления, испытаний авиацион-

ных двигателей. Этому событию предшествовала огромная работа специалистов Объединенной двигателестроительной корпорации, институтов и предприятий авиационной промышленности при беспрецедентной финансовой поддержке Правительства РФ".

По словам А.А. Иноземцева, в настоящее время ведутся работы по подготовке испытаний двигателя на летающей лаборатории Ил-76, которые запланированы на 2014 год.