



ПРОДЕЛКИ СНЕЖНОЙ КОРОЛЕВЫ

*Снег идет, и я иду.
Только жаль, что нам не по пути.*

Винни Пух

Поговорим об обледенении. По существу, это явление относится к осадкам на поверхности предметов так же, как роса, иней, изморозь, гололед. Поэтому разберемся в причинах, которые приводят к осадкам.

Прежде всего, осадки – это вода. Первоначально вода растворена в воздухе в виде пара. Пар невидим, так как состоит из молекул воды. Такой пар называют гомогенным, т. е. однородным. В нем нет границ раздела между водой и воздухом так же, как их нет в сладком чае между сахаром и водой. Пар, который мы видим как облако, туман или как белые клубы из кипящего чайника – это пар, сконденсированный в капли, содержащие огромное число молекул воды. Такой пар называют гетерогенным, т. е. неоднородным. В нем существуют границы между каплями воды и воздухом. Сам по себе гетерогенный

пар представляет собой атмосферные осадки – туман, так как он содержит сконденсированную воду, осажденную в мелкие капли. Размер капель тумана может быть в пределах 2–50 мкм.

Интересен вопрос: при каких условиях водяной гомогенный пар конденсируется?

Поскольку пар представляет собой раствор воды в воздухе, то обратимся к аналогиям. Начнем растворять сахар в воде. Мы заметим, что существует определенный предел концентрации нашего раствора. Сколько бы мы ни мешали свой сироп или просто ждали, лишние крупинки сахара так и останутся на дне нашей емкости. Они растворятся, если мы подогреем раствор. Увлеченные этим открытием, мы будем нагревать сироп далее и растворять в нем сахара все больше и больше. Впоследствии, когда сироп

остынет, мы обнаружим, что в нем выпали кристаллы сахара. Если бы у нас была возможность воздействовать на наш раствор высоким давлением, то мы бы обнаружили, что и оно вызывает кристаллизацию сахара.

Все это значит, что существующий предел растворимости зависит от температуры и давления. Их сочетание может стать таким, что пар окажется избыточным и сконденсируется. Должно быть понятным, что чем больше молекул воды в воздухе, тем легче им образовать капли, и конденсация становится возможной при более высокой температуре. Хотя атмосферное давление меняется относительно слабо, оно заметно влияет на состояние пара в воздухе.

Температура, при которой пар начинает конденсироваться, называется точкой росы. Она зависит от давления пара. Его давление косвенно связано с атмосферным давлением. Дело в том, что атмосферное давление представляет собой сумму давлений, которые создают все атмосферные газы: азот, кислород, углекислый газ, водяной пар и все остальные. Понятно, что при более высоком атмосферном давлении давление пара также выше. Но в первую очередь оно зависит от содержания пара в воздухе, иными словами, от его концентрации, которую следует понимать как количество пара в граммах в кубометре воздуха – г/м^3 . Эту концентрацию называют абсолютной влажностью воздуха. Таким образом, давление пара пропорционально абсолютной влажности воздуха.

Зависимость точки росы от давления пара можно представить в виде графика (рис. 1). Кривая графика определяет температуру T конденсации пара в зависимости от его давления P . Если состояние атмосферы соответствует точке A' , то пар не будет конденсироваться. Вода даже в закрытом сосуде будет испаряться, пока не исчезнет совсем, а количество пара в воздухе (абсолютная влажность) – расти. Такой пар называют ненасыщенным.

Если воды в закрытой емкости достаточно много, то давление пара будет расти до тех пор, пока точка A' не займет положение A на кривой графика рис. 1. Наступает равновесие между паром и жидкостью. Пар становится насыщенным. Мы можем полностью откачать воздух из нашей емкости. И все равно, пар станет насыщенным при том же его давлении в соответствии с графиком.

В любой точке B' , лежащей левее кривой, пар неизбежно конденсируется, количество воды будет непрерывно расти, а количество пара (абсолютная влажность) уменьшаться. Такой пар называют пересыщенным или переохлажденным. Понятно, что пересыщенный пар будет конденсироваться, пока его не станет достаточно мало, и он станет насыщенным. При этом точка B' займет положение B на кривой.

Таким образом, температуры, соответствующие кривой на рис. 1, являются точками росы при соответствующих давлениях.

Температура атмосферы в среднем падает на $0,65^\circ\text{C}$ каждые 100 метров. Поднимаю-

щийся теплый воздух не только уменьшает свое давление с высотой, но и расширяется. Это приводит к его более быстрому остыванию – по 1°C каждые 100 метров подъема. На высоте, где пар достигает точки росы, начинается нижняя граница облачности. В облаке пар конденсируется и выделяет теплоту, т. е. дополнительно нагревается и продолжает подниматься выше теперь уже, как облачный поток. Дальнейшая его судьба зависит от того, насколько быстро понижается температура окружающего воздуха с высотой.

С высотой атмосфера может остывать быстрее или медленнее, чем по $0,65^\circ\text{C}$ каждые 100 метров. Бывает и инверсия температуры – ее увеличение. Поэтому облака могут быть плоскими или развитыми в высоту, дождевыми или грозовыми. Понятно, что термик остановится на высоте, где его температура станет равной температуре окружающей атмосферы. В то же время, облако прекращает свой рост несколько раньше – на высоте, где абсолютная влажность пара снижается настолько, что он становится ненасыщенным.

Если атмосфера хорошо прогрета и ее охлаждение с высотой невелико, то теплый воздух термिका не достигнет точки росы, и облака не образуются.

Теперь мы готовы ответить на детский вопрос: почему облако не падает на землю? Падает, так как частицы его тумана осаждаются со скоростью до $0,1 \text{ м/с}$. Но мы этого не видим. И дело не только в малой скорости их осадения и не в облачных потоках. Любая из них, дерзнувшая опуститься ниже, где температура выше точки росы, мгновенно испаряется. Опустить или поднять облако может только положение точки росы.

Утром, когда в атмосфере царит безветренный антициклон с его высоким давлением, туманы образуются в низинах и над водой, где за ночь собрался холодный воздух. По мере прогрева земли солнцем туман исчезает. При более низком давлении в отсутствие антициклона туманы не образуются.

Чтобы математически описать поведение пара относительно точки росы, придумали величину, которую назвали относительной влажностью воздуха. Из графика рис. 1 видно, что удобно иметь дело с давлением пара. Точке росы (точке A на кривой) соответствует давление, при котором пар насыщен. Точке A' соответствует меньшее давление и ненасыщенный пар. Так вот, отношение дав-

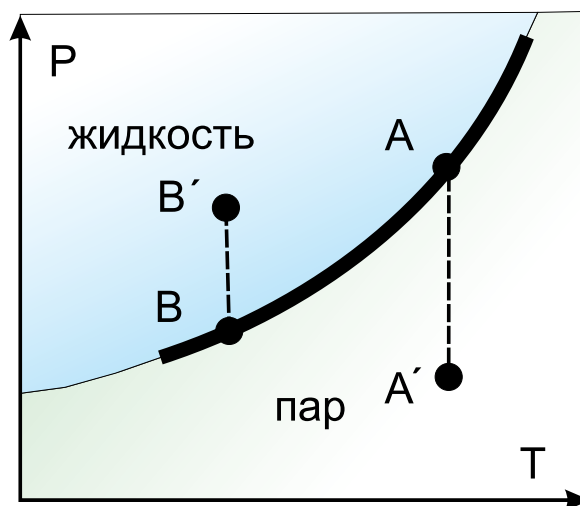


Рис. 1.
Зависимость точки росы
от давления пара

ления пара в воздухе (в точке А') к давлению насыщенного пара при данной температуре (в точке А) и называется относительной влажностью. Чем дальше точка А' находится от кривой точек росы, тем суше воздух. Относительная влажность выражается в процентах. Понятно, что относительная влажность пересыщенного пара более ста процентов.

Аналогичные рассуждения можно применить и к взаимоотношению газообразной и твердой фаз воды – к пару и льду. Точно так же можно нарисовать график в виде восходящей кривой, описывающий твердое и газообразное состояние воды. Часто можно встретить график, описывающий все три состояния, в том числе и жидкое. Он имеет три ветви (рис. 2) и называется фазовой диаграммой воды. Думаю, что нет смысла его пояснять. Он понятен читателю, который разобрался в предыдущих объяснениях. Хотя удивительным может показаться ее прямой участок, отделяющий лед от воды – он отклонен влево. Это означает, что холодный лед можно расплавить высоким давлением, и это связано с расширением льда при понижении температуры. Этому аномальному явлению обязано существование жизни на Земле!

Следует добавить, что твердое вещество может испаряться, по терминологии физиков – сублимироваться, а газообразное конденсироваться сразу в твердое. Классический пример сублимации – испарение твердого йода. За зиму во время морозов 30% снега успевает испариться.

Сделаю примечание. В метеорологии термин сублимация применяют в противоположном смысле – сублимацией называют конденсацию пара в лед. Поскольку метеорология нас интересует больше, то и мы также термином «сублимация» будем означать конденсацию пара в лед. (Обратный процесс – десублимация или возгонка.)

Попробуем теперь рассмотреть осадки с позиций наших знаний о свойствах воды.

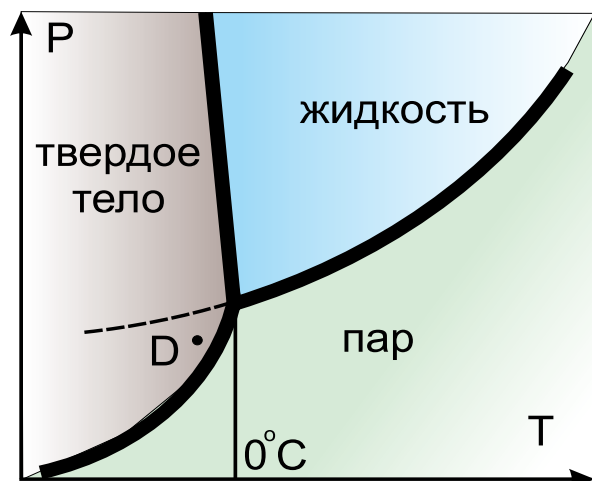


Рис. 2.
Условия существования
твердого, жидкого и
газообразного состояния
воды

Начнем с росы. Утром на траве ее может выпасть до 300 литров на гектар площади. Роса выпадает в условиях антициклона, т. е. высокого атмосферного давления. Поэтому она является надежным признаком хорошей погоды. В том смысле, что будет ясно, дождя не предвидится, но может быть ветер. Когда приближается циклон с его низким давлением, относительная влажность воздуха уменьшается, и утренняя роса не выпадает – а это признак ухудшения

погоды. Потом циклон принесет влажный воздух с высоким содержанием пара при низком давлении атмосферы. Могут быть туманы и дождь.

Поскольку я летаю на МДП, мне проще говорить о влиянии осадков именно на полет дельтаплана. В прошлом крылья шили из материалов, чувствительных к влажности воздуха. Это были капрон (ткань «Дельта»), АЗТ (авиационная защитная ткань – пропитанный хлопок), каландрированный лавсан. Трудно понять разработчиков капроновых тканей для дельтапланов, так как датчиком влажности в гигрометре для измерения относительной влажности воздуха может быть капроновая нить. С ростом влажности она растягивается. Помню случаи, когда пилоты намазывали свои крылья из АЗТ машинным маслом, чтоб они меньше вытягивались от влаги. В нашей практике были капроновые крылья на МДП. Во влажную погоду они значительно теряли свои несущие свойства. На снижении при отдаче ручки это крыло не спешило с выходом в горизонтальный полет. В конце концов, один из аппаратов был вдрызг разбит на химии при перелете через препятствие. Известны в прошлом и другие случаи аварий МДП с капроновыми крыльями.

Современные ткани практически не боятся влаги, поэтому взлет с мокрым крылом безопасен. В полете ткань быстро просыхает.

Большую опасность представляют собой твердые осадки: иней, изморозь, лед. Если они появились на вашем аппарате, то их называют обледенением.

Как это ни странно, отложение снега может появиться и в теплое время года. Местом его образования является карбюратор. Быстро испаряющееся топливо сильно охлаждает его. И если относительная влажность воздуха высока, произойдет отложение снега на деталях карбюратора. Двигатель начнет работать с перебоями. Когда еще и холодно, распыленное топливо будет конденсироваться в крупные капли по мере его движения по впускным трубопроводам и оседать на их стенках. Это обеднит смесь.

В Интернете мне попался график обледенения карбюратора (рис. 3). Из него можно понять, насколько опасным может быть это явление. Впускной воздух нуждается в подогреве. Иногда греют сам карбюратор. Мы летаем на моторе воздушного охлаждения VW-1835. Установили, что при температуре воздуха ниже 15–20°C пора ставить обогреватель впускного воздуха. На рис. 4 изображен наш обогреватель в виде алюминиевого стакана, коаксиально надетого на выпускной патрубок. Воздух для карбюратора отбирается из зазора между стаканом и патрубком. Аналогичное устройство можно сделать на глушителе. Там может быть просто изогнутая пластина.

Прежде чем двигаться дальше, обратим внимание на переохлажденные жидкость и пар. Известно, что дистиллированная вода

замерзает при 0°C. Мы можем выставить ее на сильный мороз и обнаружить, что она долго не замерзает, хотя ее температура уже сравнялась с окружающей. В сильно переохлажденную бутылку с водой добавим немного снега и сильно встряхнем ее. Увидим, что в воде начнут появляться кристаллы льда. Это значит, что переохлажденная вода находится в неустойчивом состоянии. Точнее выражаются физики – наша вода находится в метастабильном состоянии. Она бы оставалась жидкой и далее, если бы мы на нее чем-то не подействовали. В таком же состоянии находится шарик в полой ямке на макушке выпуклой поверхности. Его равновесие весьма условно – чуть его толкни, и он выскочит из ямки и скатится вниз. Показателен опыт с бутылкой пива. Аккуратно откройте ее, чтобы пиво почти не пузырилось. Потом ударьте по горлышку сверху деревяшкой. Пиво мгновенно вспенится и почти все выскочит из бутылки. Не облейтесь...

Обратим внимание, что вода замерзает на уже имеющихся кристаллах льда. Новые льдинки не появляются. Известно, что для начала кристаллизации воды, ее кипения или конденсации пара нужны некоторые центры, от которых начнется процесс. Попробуйте долго кипятить воду в пробирке, потом остудить ее и начать греть снова. Она нагреется выше 100°C, а потом большой пузырь пара выбросит ее наружу. Чтобы этого не случилось, на дно бросают небольшой пористый предмет (мел, камушек). Кипение будет происходить от предмета, а точнее, от микропузырьков на поверхности пористого предмета. Здесь мы также имеем метастабильное состояние перегретой воды.

На большой высоте, где всегда холодно и воздух чист, водяной пар находится в переохлажденном состоянии. Когда пролетит реактивный самолет, он выбрасывает мельчайшие частицы своей копти. Они и играют роль центров (ядер) конденсации. За самолетом образуется белый инверсионный след, который надолго остается в небе.

Почему так происходит? Дело в строении молекулы воды. Она состоит из одного отрицательно заряженного атома кислорода и двух положительно заряженных атомов водорода. Их центры лежат не на одной линии, а образуют своеобразный «бумеранг» с углом 104° (рис. 5). Видим, что электрические заряды разнесены, и молекула воды оказывается поляризованной. Такое образование в физике называют диполем – частицей с двумя полюсами. На рисунке диполь показан в виде овала, противоположные

концы которого имеют разный заряд. Эти овалы (я имею в виду и молекулы воды) стремятся прилипнуть к какому-нибудь телу, поляризуя его (рис. 5). Вот вам и причина для конденсации.

Вы спросите: а почему они сами не слипаются? Слипаяются, но не безгранично. Мало того, они и в жидком состоянии собираются в своеобразные комки – кластеры, содержащие десятки молекул. В целом кластер оказывается неполяризованным, и поэтому кластеры слабо притягиваются друг к другу. Следующий разумный вопрос: почему молекулы воды прилипают к твердым микрочастицам, а не к кластерам? А потому, что эти частицы в тысячи раз крупнее кластеров и вероятность их столкновения с молекулами воды и теми же кластерами гораздо выше. Некоторое количество молекул воды покрывают поверхность микрочастиц в воздухе, даже если температура выше точки росы. Это выглядит как дымка. И, кстати, принято считать, что если видимость больше километра, то мы имеем дымку, а если меньше, то туман.

Вот и получается, что для конденсации, кристаллизации и начала кипения нужны центры в виде микрочастиц или пузырьков, которые инициируют эти процессы.

Теперь, когда мы убедились, что Снежная королева является полярной родственницей Василисы Премудрой, посмотрим, что она вытворяет с нашим ЛА, когда холодно.

Вспомним, что температура воздуха с высотой падает в среднем на 0,65°C каждые

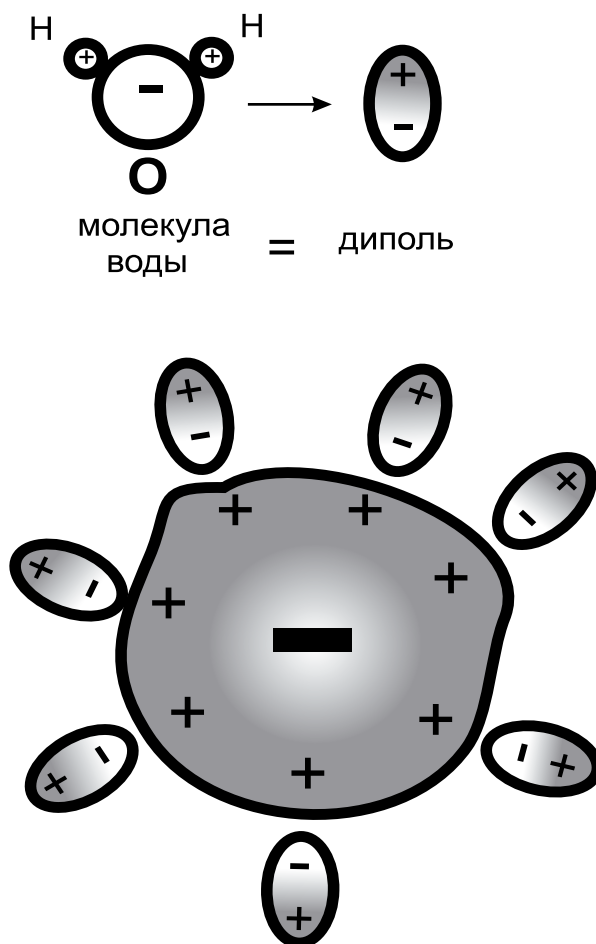


Рис. 5.
Строение молекул воды и
возможность их конденсации
на твердой микрочастице

100 метров. Если полеты происходят при температуре воздуха у земли около 0°C и когда относительная влажность достаточно высока, то на определенной высоте в несколько сот метров вы можете обнаружить, что гриф трапеции и нижние тросы стали скользкими. При этом корпус телеги и другие протяженные поверхности остаются по-прежнему сухими. Вас озадачит то обстоятельство, что вы летите гораздо ниже облаков, т. е. температура окружающего воздуха выше точки росы. Во-первых, на вашей высоте полета температура уже стала отрицательной. Во-вторых, относительная влажность высока – более 80%. А в холодное время года влажность часто бывает более 90%. Если присмотреться к графику фазовой диаграммы воды (рис. 2), то мы заметим, что пар конденсируется в лед (сублимирует) при меньшем давлении, чем при конденсации в воду. Пунктиром обозначено продолжение ветви вода-пар, когда вода переохлаждена. Если состояние атмосферного пара описывается, например, точкой D на графике, то пар будет сублимироваться на твердую холодную поверхность. При этом с каждого грамма пара выделится по 540 калорий тепла после его конденсации и далее по 80 калорий тепла после его замерзания. Все это выглядит, как намерзание пара на мокрую поверхность с образованием скользкого льда. Намерзают и мокрые микрочастицы пыли. Возможно, именно они в первую очередь осаждаются на поверхность трапеции и тросов, которые становятся скользкими. Также могут обледенеть и лопасти воздушного винта. Это дурной признак – пора снижаться.

Если вам предстоит лететь на МДП через облако при температуре чуть ниже нуля, то обледенение будет более быстрым. Чем выше скорость ЛА, чем резче контуры обтекаемых предметов (трос, тонкий профиль и т. д.)

и чем крупнее капельки воды, тем больше их сталкивается с препятствием. Все дело в инерции капль. При обтекании корпуса телеги с плавными обводами капли не испытывают больших ускорений, движутся вдоль линий тока и с ним почти не сталкиваются. Телега остается сухой (как и в предыдущем случае, когда тросы и трубы обмерзают, а корпус телеги – нет). На скоростных самолетах толщина обледенения может достигать 10 см.

Облако может оказаться электрически заряженным – это определяется по поведению компаса. Его катушка начинает беспокойно поворачиваться или дергаться. Обледенение ускорится. Этот эффект был обнаружен и объяснен еще в 1888 году. Электрически заряженный пар тем более прилипнет к вашему аппарату.

Самый тяжелый случай – когда холод гораздо ниже нуля. Тогда обледенение будет интенсивным, захватит собой и крыло. Мало того, начнется и непосредственная сублимация пара – появятся снежные кристаллы. Некоторые крылья МДП не терпят снега на своем лобике. Аппарат становится условно управляемым и перестает нормально лететь. Идут ранние срывы, и при отданной ручке аппарат сваливается. Это нужно учитывать на аварийной посадке и садиться на повышенной скорости.

Чаще всего на вершинах кучевых облаков капли покрупнее, и обледенение там более интенсивное. В условиях теплого фронта более опасной является нижняя часть слоисто-дождевых облаков – там крупных капель воды больше.

Крылья, у которых обтекатель лобика гладкий и блестящий, как пленка, не смачиваются водой. Это затрудняет их обледенение, что способствует зимним полетам. Тем не менее, лобик всегда нужно осматривать перед полетом, так как на нем может появиться иней или изморозь.

Рис. 3.
График обледенения
карбюратора

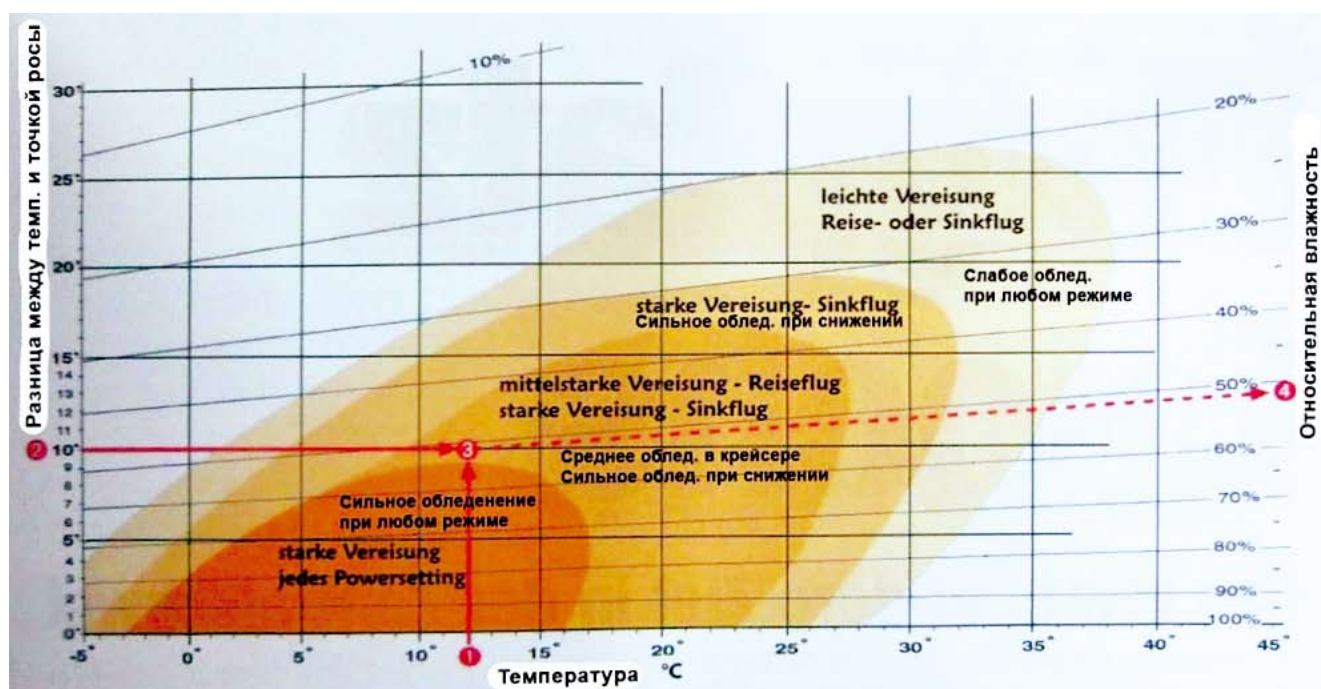




Рис. 4.
Способ подогрева
впускного воздуха

В любом случае, полеты на СЛА в облаках допустимы далеко не всегда. Наша практика показала, что это хорошо делать только в простую погоду, осенью или зимой, когда облака неактивны, при положительной температуре. Если облачность сплошная, обратите внимание на ее фактуру. Равномерный серый цвет означает большую толщину сплошной облачности. Туда залетать не следует. Среди слоистых облаков попадаются активные кучевые. Их не видно, и в этом их опасность. Хорошо, когда цвет облаков неоднородный. Это означает, что имеются разрывы между облаками, даже если они и высокие. Этим можно пользоваться. Полет желательно строить так, чтобы набирать высоту, летая между облаками. Сквозь облако комфортно проходить, если его высота не более 300 метров. Идеальные условия, когда высота нижней кромки 200–300 м, и высота облаков такая же. Гораздо приятнее летать между облаками, чем внутри них. На борту обязателен навигатор, желателен указатель кренов. Высокая влажность покрывает каплями воды снаружи и изнутри любое ваше устройство, не защищенное от атмосферного влияния: фотоаппарат, автомобильный навигатор, мобильный телефон и т. п. Поэтому, если вы желаете взять в полет фотоаппарат или видеокамеру, чтобы поснимать красоты, избегайте влетать внутрь облака. А снаружи – и грандиозные громады, и сияние славы во круг вашей тени, и невообразимая синева неба над вами! Для снижения желательно выбрать темный проем между облаками. Он темный, потому что он в тени и через него просматривается темная поверхность земли.

Иней представляет собой мелкие снежинки, равномерно распределенные по поверхности предметов, траве, веткам деревьев. Он образуется из переохлажденного гомогенного

пара, который сублимирует на холодных поверхностях в снежинки со стороны слабого ветра. Иней можно обнаружить на поверхности крыла холодным осенним утром. Несмотря на свою однородность, он является строгим противопоказанием предстоящему полету. Придется ждать потепления.

Если ветер гонит холодный туман, и температура воздуха – около нуля, то его частицы, «бомбардируя» ваш ЛА, не успевают сразу замерзнуть. В результате не происходит непосредственной сублимации пара, а замерзает пленка воды. Это образует полупрозрачный лед. В полете он менее опасен, но и он ни к чему.

При температуре ниже минус 100 при повышенной влажности или тумане при слабом ветре на тонких предметах образуются интенсивные наросты кристаллов льда. Это – изморозь. Когда ветер посильнее, изморозь появляется и при более высокой температуре и выглядит, как осевший снег. Она появляется не только на ветках деревьев, но и на грубошероховатых стенах и углах домов, на которых ветер завихряется. Здесь мы имеем дело с тем же встряхиванием, которое заставляет пар осесть в первую очередь на тонких предметах.

На сильном морозе начнет замерзать влага, содержащаяся в вашем топливе. Понятно, что замерзнет она в трубках бензопровода. Поэтому хорошо, когда двигатель полностью закапотирован, т. е. находится в тепле.

Такая вот, Снежная королева.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА:

О.К. Трунов. Обледенение самолетов и средства борьбы с ним. М., Машиностроение, 1965, 248 с.

Вадим Гришаев
г.Донецк