

Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 3. С. 127–133
Thermal processes in engineering, 2024, vol. 16, no. 3, pp. 127–133

Научная статья
УДК 536.2

Метод поиска термальных восходящих потоков воздуха на основе математической модели теплофизического состояния близлежащего пространства беспилотного воздушного судна

А.Д. Ежов^{1✉}, М.С. Шилов¹, Д.М. Гритчин¹

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия
✉ ezhov@gmail.com

Аннотация. Данная работа направлена на изучение восходящих конвективных потоков воздушных масс. Понимание природы этого процесса позволит использовать конвективные явления в атмосфере как источник энергии для различных летательных аппаратов. Рассматриваются методы поиска восходящих потоков, а также предлагается алгоритм использования найденных потоков. Представлена некоторая верификация методов.

Ключевые слова: восходящий поток, беспилотные летательные аппараты, парение, планеры, естественная конвекция, нейросети

Для цитирования. Ежов А.Д., Шилов М.С., Гритчин Д.М. Метод поиска термальных восходящих потоков воздуха на основе математической модели теплофизического состояния близлежащего пространства беспилотного воздушного судна // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 3. С. 127–133. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=180176>

Original article

Method of searching for thermal upward air flows based on a mathematical model of the thermophysical state of the nearby space of an unmanned aircraft

A.D. Ezhov^{1✉}, M.S. Shilov¹, D.M. Gritchin¹

¹Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia
✉ ezhov@gmail.com

Abstract. This work is aimed at studying such atmospheric phenomenon as upward convective flows of air masses. Understanding the nature of this process will make it possible to use convective phenomena in the atmosphere as a source of energy for various aircraft. Methods for finding upstream flows are discussed, and an algorithm for utilizing the found flows is proposed. Some verification of the methods is also presented.

Keywords: upward flow, unmanned aircraft, hovering, gliders, natural convection, neural networks

For citation. Ezhov A.D., Shilov M.S., Gritchin D.M. Method of searching for thermal upward air flows based on a mathematical model of the thermophysical state of the nearby space of an unmanned aircraft. *Thermal processes in engineering*, 2024, vol. 16, no. 3, pp. 127–133. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=180176>

Введение

Автоматическая ориентация и управление беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) в пространстве необходима для преимущественного использования восходящих потоков воздушных масс в атмосфере Земли в качестве источника энергии и выбора наиболее эффективного маршрута следования. Такой способ управления позволит существенно снизить затраты бортовых источников питания и повысить продолжительность автономного полета [1]. БПЛА с таким алгоритмом управления могут решать различные задачи: патрулировать и вести общее наблюдение за территориями по произвольному маршруту, производить ретрансляцию сигналов и повышать эффективную дальность беспроводных систем связи, проводить геодезические, поисковые и разведывательные операции на большие расстояния.

Для нахождения восходящих потоков (термик) по нескольким ключевым параметрам можно воспользоваться двумя методами: смоделировать статический закон управления летательным аппаратом, основываясь на глубоком понимании физической и математической природы потока, или воспользоваться алгоритмом управления на основе машинного обучения. Поскольку нейронная сеть позволяет обеспечить наблюдаемость и более глубокий анализ трудно моделируемых восходящих потоков, ее использование для достижения результата выглядит более перспективным.

Пример использования нейронной сети представлен в работе [2], в которой проводилось моделирование полета, однако авторы считают, что неизменная система обучения с подкреплением может быть использована для дальнейшего совершенствования алгоритма управления на основе взаимодействия с реальным миром.

В работе [2] в качестве основного критерия восходящего потока в целях дальнейшей корректировки траектории принималось изменение во времени полной удельной механической энергии $E_{\text{мех}}$:

$$\frac{dE_{\text{мех}}}{dt} = \dot{E}_{\text{мех}} = \frac{d}{dt} \left(gz + \frac{u_i^2}{2} \right) = g\dot{z} + u_i \dot{u}_i.$$

Таким образом, локальный набор высоты и увеличение потенциальной энергии за счет потери кинетической энергии не выполнит это условие. При этом понятно, что обнаружение термика происходит в непосредственной близости от его эпицентра.

Авторы настоящей статьи считают, что, используя набор из нескольких измеряемых параметров, можно достичь обнаружения термика на некотором расстоянии от него.

Термодинамическое обоснование конвекции

В гравитационном поле движение воздушных масс возникает в результате различной плотности холодных и горячих объемов воздуха. Тепловые солнечные лучи проходят сквозь воздух и нагревают лишь только землю, поэтому явление термика по сути своей является конвекцией между атмосферой и землей. Нагреваемые от земной поверхности объемы воздуха поднимаются вверх, а охлажденные опускаются вниз. Таким образом, имеет место свободная конвекция в ограниченном пространстве – между поверхностью земли и условной границей на некоторой высоте над облаком.

Нагретые слои создают некоторую архимедову силу, вызванную неравномерным распределением плотности газа в неоднородном поле температур. Без учета влияния неоднородности давления неоднородность плотности ρ описывается с помощью соотношения:

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta \tilde{T}),$$

где \tilde{T} – отклонение от средней температуры T_0 ; ρ_0 – средняя плотность газа; β – коэффициент термического расширения газа:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \times \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p.$$

Поскольку под действием архимедовой силы возникает упорядоченное движение (термик), по сути, за счет тепловой энергии Солнца, на пер-

вый взгляд может показаться нарушение второго закона термодинамики. Однако, как показано в работе [3], энтропия климатической системы в целом уменьшается, что связано в том числе и с образованием термиком.

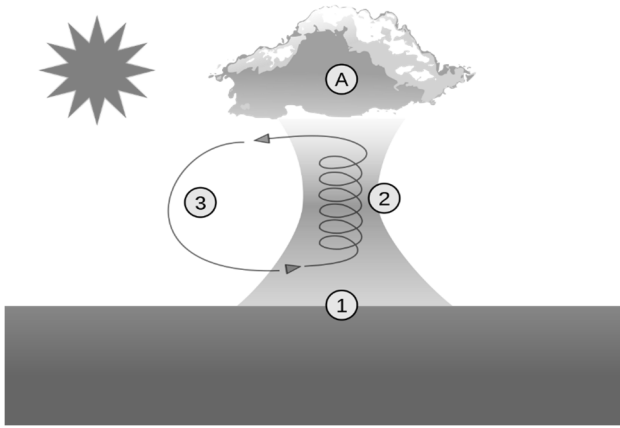


Рис. 1. Схематичное изображение термика: 1 – нагрев воздуха от поверхности земли, 2 – механическое движение воздуха вверх, 3 – нисходящий поток охлажденного воздуха. А – облако над термиком, линия – траектория полета

Для понимания динамики движения воздушных масс необходимо рассматривать уравнения движения и энергии для несжимаемого газа. В приближении Буссинеска они соответственно записываются в виде [4]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_j}{\partial x_j} &= 0; \quad \frac{\partial W_j}{\partial t} + W_i \frac{\partial W_j}{\partial x_i} = \\ &= -\frac{1}{\rho_0} \times \frac{\partial}{\partial x_i} (\delta_{ij} \tilde{p}) + \nu \times \frac{\partial^2 W_j}{\partial x_i^2} + \beta \tilde{T} g_j \\ \frac{\partial \tilde{T}}{\partial t} + W_i \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i} &= -a \times \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial x_i^2}, \end{aligned}$$

где \vec{W} – вектор скорости микрообъема газа, \vec{g} – ускорение свободного падения, ν – кинематическая вязкость, a – теплопроводность, \tilde{p} – отклонение от давления атмосферы p_0 , средняя плотность газа ρ_0 определяется из уравнения состояния идеального газа:

$$\rho_0 = \frac{p_0}{RT_0}.$$

Как известно, из представленной выше системы уравнений можно образовать два критерия (числа) подобия: Грасгофа Gr и Прандтля Pr :

$$Gr = \frac{g\beta\tilde{T}l^3}{\nu^2}; \quad Pr = \frac{\nu}{a},$$

где l – характерный размер. При этом, как известно, из данных чисел подобия можно образовать в комплекс:

$$Ra = Gr \times Pr,$$

называемый числом Рэля. Решение задачи также зависит от отношений теплопроводностей поверхности a_w и газа a .

В работе [4] утверждается пороговое значение числа Рэля Ra , выше которого состояние механического равновесия нарушается, и возникает конвекция – термик. Отмечается также влияние градиента температуры в атмосфере на порог возникновения конвекции.

В процессе самой же конвекции имеет место неоднородность температуры в направлении, перпендикулярном скорости движения, а также наличие не только восходящих, но и нисходящих потоков, что объясняется уравнением неразрывности.

Так, например, известно, что при числах Рэля $Ra = 10^3$ имеет место движение среды под действием конвективного теплообмена между нагретой нижней поверхностью и газом [5]. При этом отмечается значительное влияние граничных условий на пороговые числа Рэля, что подтверждается наблюдениями. Так, например, наблюдалось, что дополнительная искусственная турбулизация масс воздуха близ поверхности земли, способствует образованию термика.

Это означает, что число Рэля Ra является приемлемым критерием образования термика, важно лишь выбрать соответствующий характерный температурный перепад \tilde{T} и характерный размер. Выбор характерных параметров является в некоторой степени вариативным и обусловлен максимизацией соответствия числа Ra и реальной обстановки.

Электронапряженность в атмосферных явлениях

Основываясь на результатах, приведенных в работе [6], в эпицентре любой восходящей воздушной массы будет повышенная концентрация отрицательно заряженных частиц. По результатам многочисленных экспериментальных данных [6] можно сделать вывод, что напряженностью электрического поля 4–20 В/м обладают как восходящие, так и нисходящие потоки, и напряженность тем больше, чем интенсивнее

вертикальная скорость подъема и степень турбулизации. Исходя из выше указанной информации и основываясь на результатах экспериментов в [6], использование бортовых датчиков напряженности как части комплексной системы поиска представляется целесообразным.

В предположении, что термики являются однородно заряженными, бесконечно длинными цилиндрами радиусом ~ 100 м, получаем:

$$E \sim \frac{10^4}{d} \times \frac{V}{m},$$

где d – расстояние от восходящего потока (в м). Таким образом, электрическое поле на расстоянии 1 км от потока составляет ~ 10 В/м.

$$E(d) = \sqrt{c_s \left(\frac{\beta}{1,37\pi\epsilon_0 d} + \frac{\rho g d}{8,22\epsilon_0} \right)}.$$

Важно отметить, что такой параметр, как концентрация пыли n_p , коррелирует с напряженностью электрического поля. Этот факт отмечается, например, в работе [7]. Следовательно, помимо напряженности E , еще одним параметром, коррелирующим с термиком, является концентрация пыли.

Влажность в термиках

Поскольку влажный воздух легче сухого, относительная влажность коррелирует с интенсивностью термика. Масштабные измерения над Германией летом 2018 г. показывают [8], что влажность является доминирующей движущей силой термиков, по крайней мере, в верхних трех четвертях между землей и основанием облаков.

Известно, что влажный воздух легче сухого [9]. Стоит также отметить, что по мере движения воздух в термике охлаждается, что ведет к повышению влажности внутри термика. При достижении относительной влажности значения 100 % влага по мере дальнейшего подъема конденсируется, выделяя скрытую теплоту фазового перехода. Величина выделяющейся теплоты зависит от абсолютной влажности в термике и является дополнительным источником движения восходящих потоков.

Отсюда понятны наблюдения, показывающие доминанту влажности на высотах, близлежащих к облаку. В связи с неопределенностью в опре-

делении «на глаз» нижней границы облака можно сказать, что до образования достаточно хорошо видимых паров воды, сначала образуются слабо видимые капли на высотах, близлежащих к облаку. Этим и объясняется доминирующее действие влажности – за счет выделяющейся при конденсации теплоты.

Для того чтобы распознать доминанту влажности, необходимо либо предотвратить мешающее влияние на измерение температуры, либо скомпенсировать измеренные данные математически. Авторы работы [8] утверждают, что некорректное измерение температуры может легко привести к выводу о том, что движение термиков ошибочно объясняется разницей температур, которой на самом деле не существует.

Измерительное устройство было расположено в непосредственной близости от частей фюзеляжа планера. В этом случае температура T_1 соответствующих частей планера, температура поступающего окружающего воздуха T_0 и температура T_2 в месте установки датчика функционально связаны между собой:

$$\frac{T_2 - T_1}{T_0 - T_1} = \exp \left\{ -\frac{\alpha A}{\dot{m} c_p} \right\}.$$

Параметры α – коэффициент теплопередачи в Вт/м²К, A – площадь канала воздушного потока в м², \dot{m} – массовый расход воздуха в кг/с, c_p – удельная теплоемкость воздуха в Дж/кгК принимаются достаточно постоянными. Поэтому экспоненциальная функция может быть упрощена до константы $(1 - f)$ при $0 \leq f \leq 1$. Тогда уравнение можно записать как:

$$T_2 = T_1 \times f + T_0 \times (1 - f).$$

Приравнивание уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= kA(T_0 - T_1) \\ \dot{Q} &= c_p \dot{m} \times \dot{T}_1 \end{aligned}$$

приводит к дифференциальному уравнению, которое описывает температурный профиль T_1 материала самолета и оборудования в зависимости от температуры окружающего воздуха T_0 :

$$\frac{c_p \dot{m}}{kA} \times \dot{T}_1 + T_1 = T_0.$$

Сравнивая скомпенсированную температуру T_0 с влажностью φ , авторы работы [8] пришли к выводу, что в верхних слоях атмосферы доминирующая сила – влажность. Результаты их экспериментов приведены на рис. 2.

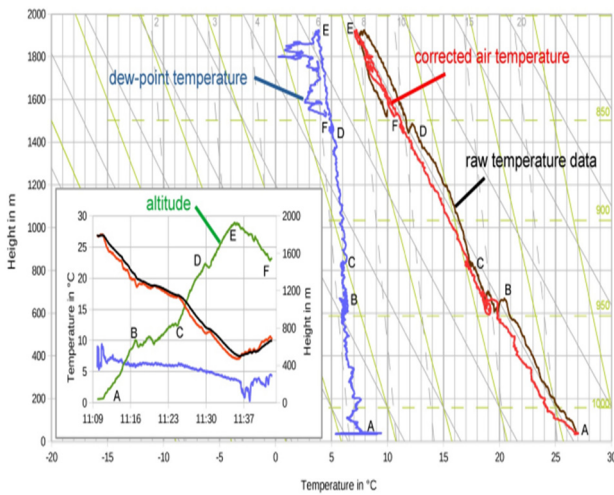


Рис. 2. Результаты экспериментов, проведенных в Германии [8]

Термодинамические методы обнаружения термиков

Как было отмечено ранее, число Рэлея определяется как:

$$Ra = Gr \times Pr = \frac{g\beta l^3 \Delta T}{\nu^2} \times Pr,$$

где ΔT , l – характерные перепад температур и размер. С учетом выражения для коэффициента термического расширения идеального газа:

$$\begin{aligned} \beta &= -\frac{1}{\rho} \times \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p = -\frac{RT}{p} \times \left(\frac{\partial}{\partial T} \frac{p}{RT} \right)_p = \\ &= -\frac{RT}{p} \times \left(-\frac{p}{RT^2} \right) = \frac{1}{T}. \end{aligned}$$

Окончательная формула для числа Рэлея Ra запишется в виде:

$$Ra = \frac{g \times Pr}{\nu^2} \times \frac{\Delta T}{T} \times l^3.$$

При этом теплофизические свойства воздуха – вязкость ν и число Прандтля Pr – являются справочными величинами [4]. Число Pr для воздуха аппроксимируется полиномом 3-й степени в диапазоне $T = 300 \div 1300$ К:

$$Pr = 8,62 \times 10^{-1} - 8,22 \times 10^{-4} \times T + 1,17 \times 10^{-6} \times T^2 - 4,86 \times 10^{-10} \times T^3.$$

Кинематическая вязкость ν также аппроксимируется полиномом 3-й степени в диапазоне $T = 200 \div 500$ К:

$$\nu = -4,3 \times 10^{-1} + 6,79 \times 10^{-3} \times T + 1,82 \times 10^{-4} \times T^2 - 7,85 \times 10^{-8} \times T^3.$$

В качестве характерных параметров авторы предлагают использовать два варианта. Первый

заключается в использовании температур, измеренных в точках, разнесенных на длину порядка 1 метра, при этом за характерный размер следует принимать длину, на которую разнесены точки.

Второй вариант заключается в использовании разницы температур горячей стенки – поверхности земли и холодной стенки – температура на высоте нижней границы облака – температура точки росы. В качестве характерного размера принимается высота нижней границы облака.

Конечно, ни первый, ни второй вариант не отражают в точности реальное соответствие с интенсивностью образуемого термика. Для более точной оценки необходимо использовать температуру воздуха на верхней границе самого термика, которая может быть выше верхней границы облака. Аналогично и для характерного размера. Однако из-за сложности определения параметров на границе термика авторы данной работы отдают предпочтения второму варианту, опираясь на гипотезу об корреляции параметров на нижней границе облака и верхней границе термика.

Второй же вариант можно реализовать следующим образом. Поскольку средний температурный градиент в тропосфере известен и равен 0,1 К на каждые 100 м, измеряя температуру на известной высоте, а также относительную влажность, путем простых преобразований нетрудно найти температуру на поверхности земли и температуру точки росы. Определяющая температура для теплофизических свойств среды – средняя температура между рассчитанными температурами поверхности земли и точки росы.

Важно отметить турбулентный режим течения в термике. Так, для атмосферного пограничного слоя хорошо известны профили безразмерных параметров, например кинетическая энергия турбулентности K , что позволит отличить изменение интересующих нас средних параметров потока (температуры, влажности) от их турбулентных пульсаций. Конкретный алгоритм требует дальнейших исследований, однако понятно, что для достоверной регистрации турбулентных пульсаций необходимы малоинерционные измерительные приборы, способные разрешить быстроменяющиеся пульсации. Предлагается использовать, например, приборы, используемые в работе [10].

Алгоритм дистанционного поиска термик

Численное моделирование процесса естественной конвекции показывает, что имеет место пространственная неоднородность температурного поля [11]. При этом, как и ожидалось, внутри самого термика (восходящего потока) производная $dT/dr < 0$, а в кольцевых нисходящих потоках $dT/dr > 0$, где r – расстояние от термика до рассматриваемой точки.

Однако известно, что пространственные и временные координаты можно связать следующим образом:

$$\frac{dT}{dr} = \frac{dT}{d\tau} \times \frac{d\tau}{dr} = \frac{dT}{d\tau} \times \frac{1}{v},$$

где $v = dr/d\tau$ – скорость относительного движения центра термика и рассматриваемой точки. В случае если $v < 0$, то есть точка приближается к термику, то:

$$\begin{cases} \frac{dT}{d\tau} < 0, \tau < \tau_{\text{тер}} \\ \frac{dT}{d\tau} > 0, \tau > \tau_{\text{тер}} \end{cases},$$

где $\tau_{\text{тер}}$ – момент времени залета в термик. Можно сделать вывод, что для любой относительной скорости $v \neq 0$ рассмотрение производных по времени не менее справедливо отражает пространственное положение термика.

Существует множество параметров, по которым можно определить термик: относительная влажность φ , напряженность электрического поля \vec{E} , концентрация пыли $n_{\text{п}}$ и число Рэлея Ra . Следовательно, стоит рассматривать в качестве функции критерия термика f не производную какой-либо одной из вышеперечисленных функций, а сразу все. В качестве первого кандидата на роль функции термика f авторы предлагают использовать следующее произведение:

$$f_i(\tau) = \prod_{i,j} \frac{\int_{\tau-\tau^*}^{\tau} \left(\frac{df_i}{d\tau} - \Phi_i\right) \left(\frac{df_j}{d\tau} - \Phi_j\right) d\tau}{\sqrt{\int_{\tau-\tau^*}^{\tau} \left(\frac{df_i}{d\tau} - \Phi_i\right) d\tau \times \int_{\tau-\tau^*}^{\tau} \left(\frac{df_j}{d\tau} - \Phi_j\right) d\tau}},$$

где $f_{i,j}$ – одна из функций: $T, \varphi, Ra, \vec{E}, n_{\text{п}}$; при этом индексы i, j являются разными представлениями одного и того же индекса, функция Φ_i :

$$\Phi_i = \frac{1}{\tau^*} \times \int_{\tau-\tau^*}^{\tau} \frac{df_i}{d\tau} d\tau.$$

Первый вариант функции термика f_I по математическому смыслу представляет собой произведение корреляций производных $f_{i,j}$ по времени. При этом τ – текущий момент времени, τ^* – некоторый фиксированный отрезок времени, на котором ведется «запись» корреляций.

Однако, поскольку заведомо неизвестно, все ли базовые функции $f_{i,j}$ обладают пространственной неоднородностью, коррелирующей с расположением термика подобно температуре T , то предлагается второй вариант функции термика f_{II} :

$$f_{II}(\tau) = \sum_{i,j} \frac{\int_{\tau-\tau^*}^{\tau} \left(\frac{df_i}{d\tau} - \Phi_i\right) \left(\frac{df_j}{d\tau} - \Phi_j\right) d\tau}{\sqrt{\int_{\tau-\tau^*}^{\tau} \left(\frac{df_i}{d\tau} - \Phi_i\right) d\tau \times \int_{\tau-\tau^*}^{\tau} \left(\frac{df_j}{d\tau} - \Phi_j\right) d\tau}}.$$

Такой вариант не позволит занулить функцию f_{II} при отсутствии неоднородности какой-либо функции $f_{i,j}$. В такой форме в ряд базовых функций $f_{i,j}$ можно внести удельную полную механическую энергию e .

Авторы считают, что чувствительности данной функции термика f может хватить для обнаружения термика на достаточном расстоянии. При этом здесь под достаточным расстоянием понимается такое, за которое беспилотник успеет перестроить траекторию и залететь в термик. Поэтому предлагается использовать в качестве исходной функции для корректировки траектории именно функцию термика в форме f_{II} или f_I в зависимости от эффективности.

Заключение

Предлагаемая авторами математическая модель теплофизического состояния близлежащего пространства беспилотного воздушного судна позволит выполнять поиск восходящих потоков воздушных масс в атмосфере Земли и использовать их в качестве источника энергии и выбора наиболее эффективного маршрута следования. Такой способ управления позволит существенно снизить затраты бортовых источников питания и повысить продолжительность автономного полета. Поскольку в работе было предложено несколько гипотез, работоспособность предлагаемого метода, безусловно, требует проведения летных испытаний, что является предметом изучения в дальнейших исследованиях.

Список источников

1. **Mohamed A., Taylor G.K., Watkins S.** et al. Opportunistic soaring by birds suggests new opportunities for atmospheric energy harvesting by flying robots // *Journal of the Royal Society Interface*. 2022. Vol. 19 (196). ID 20220671.
2. **Notter S., Müller G., Fichter W.** Integrated Updraft Localization and Exploitation: End-to-End Type Reinforcement Learning Approach. // Conference: CEAS EuroGNC 2022 (May 2022). Berlin, 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/360463610_Integrated_Updraft_Localization_and_Exploitation_End-to-End_Type_Reinforcement_Learning_Approach
3. **Martin S. Singh, Morgan E O'Neill.** The climate system and the second law of thermodynamics // *Reviews of Modern Physics*. 2022. Vol. 94. DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.94.015001>
4. **Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М.** Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. Москва: Издательство «Наука», 1972. 392 с.
5. **Соколов А.Н.** Методика расчета свободноконвективного теплообмена на твердых поверхностях в широком интервале температур // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2012. № 2 (78). С. 88–91.
6. **Nilton O. Renno, Jasper Kok.** Electrical Activity and Dust Lifting on Earth, Mars, and Beyond // *Space Science Reviews*. 2008. Vol. 137 (1–4). P. 419–434.
7. **Nilton Renno, Stephen Rogacki, Michael Parker** et al. Detecting Thermals Remotely. 2008. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/view/47925759/detecting-thermals-remotely-aoss-research>
8. **Predelli O., Niederhagen R.** Humidity, the Dominating Force of Thermal Updrafts // Preprint to Technical Soaring (TS). 2019. May 16. URL: https://www.researchgate.net/publication/364757093_Humidity_the_Dominating_Force_of_Thermal_Updrafts
9. **Tsilingiris P.T.** Thermophysical and transport properties of humid air at temperature range between 0 and 100 °C // *Energy Conversion and Management*. 2008. Vol. 49. P. 1098–1110.
10. **Chechin D.G., Artamonov A.Yu., Bodunkov N.E.** et al. Experience of Studying the Turbulent Structure of the Atmospheric Boundary Layer Using an Unmanned Aerial Vehicle // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021. Vol. 57. P. 526–532. URL: <https://doi.org/10.1134/S0001433821050042>
11. **Sreekanth Ganapathi Raju, Eric Poquillon, Emmanuel Rachelson.** A Survey on Thermal Updraft Models. URL: <https://websites.isae-supaero.fr/IMG/pdf/report.pdf>

References

1. **Mohamed A., Taylor G. K., Watkins S.** et al. Opportunistic soaring by birds suggests new opportunities for atmospheric energy harvesting by flying robots. *Journal of the Royal Society Interface*, 2022, vol. 19 (196). ID 20220671.
2. **Notter S., Müller G., Fichter W.** Integrated Updraft Localization and Exploitation: End-to-End Type Reinforcement Learning Approach. *Conference: CEAS EuroGNC 2022 (May 2022)*. Berlin, 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/360463610Integrated_Updraft_Localization_and_Exploitation_End-to-End_Type_Reinforcement_Learning_Approach
3. **Martin S. Singh, Morgan E O'Neill.** The climate system and the second law of thermodynamics. *Reviews of Modern Physics*, 2022, vol. 94. DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.94.015001>
4. **Gershuni G.Z., Zhukhovitsky E.M.** Konvektivnaya ustojchivost' neszhimaemoj zhidkosti [Convective stability of an incompressible fluid.]. Moscow: Izdatel'stvo "Nauka", 1972, 392 p.
5. **Sokolov A.N.** Methodology of calculation of free convective heat exchange on solid surfaces in a wide temperature range. *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optic*, 2012, no. 2 (78), pp. 88–91.
6. **Nilton O. Renno, Jasper Kok.** Electrical Activity and Dust Lifting on Earth, Mars, and Beyond. *Space Science Reviews*, 2008, vol. 137 (1–4), pp. 419–434.
7. **Nilton Renno, Stephen Rogacki, Michael Parker** et al. Detecting Thermals Remotely. 2008. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/view/47925759/detecting-thermals-remotely-aoss-research>
8. **Predelli O., Niederhagen R.** Humidity, the Dominating Force of Thermal Updrafts. *Preprint to Technical Soaring (TS)*, 2019, May 16, 14 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/364757093_Humidity_the_Dominating_Force_of_Thermal_Updrafts
9. **Tsilingiris P.T.** Thermophysical and transport properties of humid air at temperature range between 0 and 100 °C. *Energy Conversion and Management*, 2008, vol. 49, pp. 1098–1110.
10. **Chechin D.G., Artamonov A.Yu., Bodunkov N.E.** et al. Experience of Studying the Turbulent Structure of the Atmospheric Boundary Layer Using an Unmanned Aerial Vehicle. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, vol. 57, pp. 526–532. URL: <https://doi.org/10.1134/S0001433821050042>
11. **Sreekanth Ganapathi Raju, Eric Poquillon, Emmanuel Rachelson.** A Survey on Thermal Updraft Models. URL: <https://websites.isae-supaero.fr/IMG/pdf/report.pdf>

Статья поступила в редакцию 12.02.2024; одобрена после рецензирования 11.03.2024; принята к публикации 25.03.2024.

The article was submitted on 12.02.2024; approved after reviewing on 11.03.2024; accepted for publication on 25.03.2024.