

УДК 53.09

ОБЪЁМНЫЙ НАГРЕВ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТОЛБА ВОЗДУХА МИКРОВОЛНОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В ЛИНИИ ПОГЛОЩЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

*А. Ф. Крупнов, М. Ю. Третьяков**

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Предлагается способ объёмного нагрева столба воздуха вертикально направленным микроволновым излучением на частоте спектральной линии поглощения атмосферы. Проводятся оценки эффективности нагрева для случая полосы поглощения молекулярного кислорода вблизи частоты 60 ГГц. Предложенный способ нагрева может привести к образованию новых конвекционных структур в столбе воздуха. Отмечается отсутствие в природе естественных восходящих потоков воздуха со стационарным нагревом по всей протяжённости потока.

ВВЕДЕНИЕ

Известны опыты по изучению воздействия на атмосферу (приводящего к образованию облаков, атмосферных вихрей и т. д.) путём нагрева воздуха у поверхности Земли излучением Солнца или сжиганием топлива [1–7]. Общей чертой подобных экспериментов является локальный характер нагрева у поверхности Земли, при котором температура образующегося потока воздуха убывает с высотой как из-за естественного охлаждения (примерно 1°C на 100 м высоты), связанного с расширением, так и из-за турбулентного вовлечения в поток окружающего воздуха. Известно, что препятствием для восходящих конвективных потоков является слой атмосферной температурной инверсии, в котором температура воздуха растёт с увеличением высоты, а его плотность, соответственно, уменьшается. Поток нагретого воздуха, поднимающийся под действием силы Архимеда, по мере восхождения не получает добавочного тепла, а оставшегося тепла может быть недостаточно для «сохранения плавучести» и преодоления слоя атмосферной инверсии. Так, согласно многочисленным наблюдениям, в спокойной атмосфере вертикальные столбы дыма упираются в одно дымовое облако под слоем инверсии¹, а в ряде случаев остановка потока происходит даже при мощности источника тепла у Земли от 300 до 600 МВт [5].

1. НОВЫЙ СПОСОБ НАГРЕВА

В данной статье предложен новый способ нагрева вертикального столба воздуха в условиях спокойной безветренной атмосферы с целью образования восходящего потока. Приведённые ниже оценки показывают, что применение предложенного способа позволит получить восходящий поток, способный преодолевать атмосферные слои инверсии. Он состоит в нагреве столба воздуха в каждой точке по высоте вертикально направленным слаборасходящимся микроволновым излучением, настроенным по частоте на одну из линий поглощения атмосферы. Линии поглощения в микроволновой области имеются у молекул кислорода и воды, входящих в состав атмосферы (см., например, [8]). Параметры атмосферных линий хорошо известны, их точные значения и современные методы моделирования спектров атмосферного поглощения приведены, например,

* trt@ipfran.ru

¹ Обширный иллюстративный фото- и видеоматериал можно найти в интернете по ключевым словам или получить, обратившись к авторам.

в монографии [9]. Энергия микроволнового излучения, поглощённая молекулами и распределённая по их внутренним степеням свободы, при столкновениях молекул преобразуется в энергию их поступательного движения, т. е. в тепло. Для термализации молекулы, поглотившей квант микроволнового излучения, обычно достаточно одного соударения [8].

Новый способ нагрева предположительно приведёт и к новым конвективным структурам. В соответствии с классической книгой [10] естественными конвективными потоками называются такие потоки, в которых единственной причиной движения среды является разность плотностей, вызванная тепловым расширением. Естественные потоки, возникающие в не ограниченном стенками пространстве, называются свободными конвективными потоками. В числе таких потоков рассматриваются конвективный поток вдоль нагретой вертикальной стенки, естественный конвективный поток от нагретого круглого горизонтального цилиндра, конвективный поток над горизонтальной пластинкой, горный и долинный ветры в расслоённом воздухе и т. д. Каждому из этих видов конвекции посвящены сотни работ. Конвекцию, возникающую при предлагаемом способе нагрева, следуя принятой в [10] терминологии, можно определить примерно как свободную конвекцию в столбе атмосферного воздуха, нагреваемого по всему объёму. В природе нет восходящих потоков с объёмным нагревом по всей его протяжённости, и, по нашему мнению, выделение такого потока в отдельный новый вид конвекции оправдано. Восходящие конвективные потоки воздуха могут подогреваться из-за тепловыделения при конденсации водяного пара, но это происходит лишь выше точки конденсации, ниже которой обычно и располагается как минимум один слой атмосферной инверсии.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ОЦЕНКИ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА

Интенсивность I вертикально направленного монохроматического излучения в среде с однородным коэффициентом поглощения α будет убывать (без учёта расходимости луча, которая будет рассмотрена ниже) с высотой h как

$$I = I_0 \exp(-\alpha h), \quad (1)$$

где I_0 — интенсивность излучения источника у поверхности Земли. Характерная высота убывания нагрева в $e = \exp(1) \approx 2,7$ раз при этом равняется $h_\alpha \approx 1/\alpha$. Данное обстоятельство даёт возможность выбора рабочей частоты, отвечающей линии с меньшим или большим коэффициентом поглощения в зависимости от цели нагрева. В миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн имеются линии поглощения атмосферных газов как более сильные, так и более слабые, чем рассматриваемая нами ниже в качестве примера известная полоса поглощения молекулярного кислорода, расположенная вблизи частоты 60 ГГц [8, 9]. Для устранения влияния на распространение излучения локальных движений частей атмосферы, имеющих различную температуру, а следовательно, различную плотность и, в общем случае, различный комплексный показатель преломления, рабочую частоту излучения удобно выбирать в такой точке дисперсионной характеристики среды, где реальная часть отклонения диэлектрической постоянной от единицы обращается в ноль. Для изолированной спектральной линии атмосферы эта точка соответствует максимуму поглощения. Действительная часть показателя преломления воздуха на этой частоте не зависит от плотности, и локальные изменения плотности не приведут ни к отклонению направления луча от вертикального, ни к дополнительному расхождению микроволнового излучения. Отметим, что доплеровское смещение частоты молекулярного поглощения, связанное с движением потоков воздуха, можно не принимать во внимание прежде всего потому, что ширина области спектра, в которой поглощение имеет максимум, а действительная часть показателя преломления близка к единице, велика ($10^{-2} \div 10^{-3}$ отн. ед). Она определяется частотой

межмолекулярных соударений, которая в атмосферных условиях на $3\div 4$ порядка превышает ширину (10^{-6} отн. ед), связанную с тепловой скоростью движения молекул. В свою очередь, скорость движения молекул как минимум на порядок превышает скорость воздушных потоков.

Рассмотрим полосу поглощения магнитной тонкой структуры вращательных уровней молекулярного кислорода, располагающуюся в диапазоне частот от 50 до 70 ГГц (длина волны в максимуме около 0,5 см). В пике полосы коэффициент поглощения ($\alpha_{\max}$) составляет примерно $3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ [9]. Упомянутая выше точка равенства нулю реальной части отличия коэффициента преломления от единицы для полосы кислорода по результатам исследований [11] расположена несколько ниже 60 ГГц. Отметим, что влажность воздуха, туман, пыль, аэрозоли и даже осадки в виде снега и дождя (кроме тропического ливня с интенсивностью $50\div 100 \text{ мм/ч}$) не влияют на существование и примерное положение этой точки. Это обусловлено малым уровнем поглощения (и преломления) парами воды в этой области спектра [9, 11] и тем, что длина волны излучения много больше характерных размеров пылинок, капель и т. д. Именно малый уровень поглощения обуславливает применение миллиметрового диапазона длин волн для радиолокации.

В рассматриваемой области частот существуют мощные источники когерентного излучения. Так, ещё в 1984 году фирма «Вариан» сообщила о создании источника непрерывного излучения с мощностью 200 кВт на частоте 60 ГГц [12, 13]. В статье 2017 года [14] сообщается о создании субмегаваттных непрерывных генераторов в диапазоне от 14 ГГц до субтерагерц. Современные достижения и тенденции развития мощных гиротронных источников излучения можно найти в обзорной работе [15].

Примем для оценок мощность непрерывного излучателя равной 600 кВт (что уже достигнуто в работе [16]), сечение пучка 1 м^2 , коэффициент поглощения $3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$. При этом на одном погонном метре оптического пути будет поглощаться 1800 Вт излучения, что при теплоёмкости кубометра воздуха около 300 кал/град и при отсутствии оттока тепла приведёт к повышению температуры воздуха примерно на 1,5 градуса в секунду.

Для того, чтобы понять, достаточен ли такой вклад энергии, приведём несколько грубых оценок теплопотерь для различных условий. Для первой оценки воспользуемся уравнением теплопереноса, пренебрегая турбулентной диффузией поперёк столба воздуха. В качестве начальных условий возьмём нагретый вертикальный столб воздуха, имеющий в сечении гауссово распределение температуры, перепад температуры между центром и окружающим воздухом 10°C , площадь сечения по полуамплитуде температурного перепада 1 м^2 . Если предположить, что охлаждение идёт только за счёт молекулярной диффузии (коэффициент температуропроводности воздуха согласно справочникам составляет около $0,2 \text{ см}^2/\text{с}$ [17]), то соответствующее остывание в центре столба происходит со скоростью $0,01$ градуса в секунду. Всплывание нагретого столба воздуха приведёт к завихрениям (турбулентному перемешиванию), аналогичным хорошо известным завихрениям клубов дыма, поднимающегося из труб (см. сноску 1). В таком режиме при расчёте теплообмена следует, казалось бы, заменить коэффициент молекулярной температуропроводности коэффициентом турбулентной температуропроводности, который на $4\div 6$ порядков превышает молекулярный коэффициент [18]. Скорость остывания нагретого столба, которая согласно уравнению теплопереноса прямо пропорциональна этому коэффициенту, при этом увеличится примерно до 1 градуса за миллисекунду. Нереальность полученного результата доказывается тем, что в таком случае не существовало бы поднимающихся столбов дыма — поток мгновенно, за миллисекунды, остывал бы вблизи кромки трубы. На самом деле тепло не «разбегается» в разные стороны, а уносится вверх всплывающим потоком. То, что дым (или водяной пар), делающий видимыми форму и размеры восходящего потока, поднимается в спокойной атмосфере высоко в небо, означает, что область турбулентного теплообмена ограничена только областью потока [18, 19]. В пределах этой области происходит интенсивный теплообмен, обусловленный

сильным перемешиванием, характерным для турбулентного движения, что приводит к быстрому выравниванию температуры в различных участках восходящего потока, а вне турбулентной области имеет место безвихревое турбулентное движение, постепенно переходящее в ламинарное по мере удаления от границ области [18, 19]. Остывание же свободного конвективного потока определяется главным образом вовлечением окружающего воздуха в поднимающийся поток. Скорость этого вовлечения составляет примерно 0,1 от скорости потока [19, 20], т. е. невелика. Именно поэтому столбы дыма бывают высокими.

Для простейшей эмпирической оценки средней скорости остывания потока с учётом турбулентного движения примем, что скорость, с которой поднимаются клубы дыма, не зависит от высоты и составляет величину порядка 1 м/с. Перепад температур между дымом, выходящим из заводской трубы, и окружающим воздухом около 100 °С. Столб дыма в спокойной атмосфере можно проследить до высоты порядка 100 м. Будем считать, что при этом он остывает до температуры окружающего воздуха. Отсюда получается, что скорость остывания потока составляет в среднем примерно градус в секунду, что меньше, чем полученная выше оценка скорости его нагрева вертикально направленным излучением с мощностью 600 кВт.

Оценим теплотери свободного конвективного потока ещё одним способом. Воспользуемся результатами расчётов параметров восходящих потоков с нагревом у поверхности Земли [10, 18–20], из которых следует, что скорость подъёма свободного конвективного потока меняется с высотой как $h^{-1/3}$, а температура уменьшается пропорционально $h^{-5/3}$. Надо учесть, что это справедливо лишь для сформировавшегося потока и начиная с высоты, значительно большей характерного размера источника потока. Принимаем такие же, как раньше, начальные условия; полагаем, что заводская труба имеет выходной размер 1 м и считаем, что поток устанавливается на расстоянии, которое в e раз больше её диаметра. Получаем, что на высоте 100 м скорость потока уменьшается до 25 см/с, а отличие его температуры от температуры окружающего воздуха составляет 0,25 °С. Таким образом, поток можно считать почти остывшим, но он всё ещё продолжает подниматься. Скорость остывания максимальна в самой нижней точке такого потока и для выбранных условий составляет около 60 град/с. При этом скорость остывания быстро уменьшается с высотой пропорционально $h^{-8/3}$ (поскольку скорость пропорциональна производной от температуры) и уже на высоте около 10 м от края трубы составляет всего 1,4 градуса в секунду, т. е. становится меньше скорости микроволнового нагрева, а уже на 50 м оказывается равной скорости остывания, обусловленной молекулярной диффузией. Отметим, что такое быстрое остывание потока, нагретого у поверхности Земли и не получающего в пути дополнительного тепла, по-видимому, и послужило причиной остановки потока, поддерживаемого у поверхности Земли источником с мощностью 600 МВт [5]. Намного выгоднее поток, в котором нагрев осуществляется почти равномерно с высотой в каждой точке столба воздуха, как предлагается в нашей статье. К сожалению, никаких теоретических расчётов для оценок теплотерь в рассматриваемом случае нет. Мы ещё вернёмся к рассмотрению этого вопроса ниже.

Известные соотношения для скорости подъёма и температуры в свободном естественном конвективном потоке могут быть использованы для ещё одной оценки теплотерь при предлагаемом способе нагрева. Предположим, что мы включаем микроволновое излучение в спокойной атмосфере. Допустим, что начальное ламинарное движение постепенно нагреваемого воздуха сохраняется в течение первой секунды. Это позволит практически без потерь обеспечить начальный нагрев столба воздуха на 1,5 °С по сравнению с окружающим воздухом. Применение упоминавшихся выше соотношений к восходящему потоку, развивающемуся в таких условиях, показывает, что максимальная скорость остывания столба воздуха составляет всего 0,9 градуса в секунду, т. е. меньше скорости разогрева.

Таким образом, используя для оценок теплотерь результаты, полученные для конвектив-

ных потоков совсем другого типа, можно показать, что непрерывного поступления микроволновой энергии во всплывающий поток будет достаточно для того, чтобы он сохранял плавучесть и в слоях атмосферной инверсии. Атмосферная инверсия составляет величину от долей градуса до примерно $15^{\circ}\text{C} \div 20^{\circ}\text{C}$ по данным [22] (что, по-видимому, включает в себя все возможные на Земле ситуации, встречающиеся от районов экваториальных пустынь до полюсов холода), или, по данным эксперимента [5], от долей до единиц градусов. Необходимый для преодоления слоя инверсии разогрев вертикального столба воздуха достигается примерно за полминуты даже в неблагоприятных для эксперимента условиях, когда температурная инверсия составляет $15^{\circ}\text{C} \div 20^{\circ}\text{C}$.

На высоте 330 м (примерно равной $1/\alpha_{\max}$) нагрев уменьшится до 0,3 град/с (17 град/мин) из-за дифракционной расходимости пучка и убывания мощности из-за поглощения излучения. Дифракционная расходимость пучка составляет λ/D , где λ — длина волны, в нашем случае около 0,5 см, а $D = 1$ м — размер излучателя. В рассматриваемом примере λ/D около $5 \cdot 10^{-3}$ рад, или 17 угл. мин. Отметим, что в миллиметровом диапазоне длин волн существуют излучатели с диаметром до десятков метров, использование которых даёт возможность фокусировки излучения на определённой высоте в пределах дифракционной длины $d = D^2/\lambda$. Это обеспечивает более медленное убывание нагрева с высотой, чем следующее из уравнения (1).

Вопросы достаточности мощности излучения для различных целей должны, по-видимому, решаться в эксперименте. Вполне возможно, что заметный эффект нагрева столба воздуха будет наблюдаться и при существенно меньших, чем принятая нами для оценок, мощностях излучения именно из-за постоянного объёмного нагрева по всей протяжённости столба. Возможно также, что для ряда практических целей (например, для опытов по рассеянию смога) потребуется дальнейшее увеличение мощности излучения. В этой связи напомним о ведущейся разработке гиротрона непрерывного излучения с мощностью 2 МВт [15], и о работе над мультимегаваттными источниками непрерывного излучения в диапазоне от десятков до сотен гигагерц [14]. Для нагрева воздуха источник излучения может быть и импульсным с достаточно большой средней мощностью. В упоминавшейся выше работе [16] мощность 1 МВт поддерживалась 800 с, а в работе [15] сообщается о поддержке мощности 0,92 МВт на протяжении 30 мин.

Даже при таких больших мощностях излучения нет оснований ожидать проявления нелинейных спектроскопических эффектов, связанных, в частности, с насыщением молекулярных переходов, составляющих полосу атмосферного кислорода. Это объясняется большой скоростью столкновительной релаксации молекул при атмосферном давлении (полуширина одиночной атмосферной линии кислорода составляет около 1,5 ГГц, что соответствует времени релаксации около 100 пс) и малостью матричных элементов дипольных моментов соответствующих переходов. Матричные элементы дипольных моментов переходов тонкой структуры молекулы кислорода имеют величину порядка магнетона Бора [12], что эквивалентно примерно 0,01 дебая. Мощность, при которой начинается насыщение линий, определяется как [8, 21]

$$P_0 \sim h^2(\Delta\nu)^2 c S / (8\pi\mu_{ij}^2), \quad (2)$$

где h — постоянная Планка, $\Delta\nu$ — полуширина линии, c — скорость света, μ_{ij} — матричный элемент дипольного момента молекулярного перехода между уровнями энергии i и j . Для рассматриваемых условий насыщение будет начинаться с потоков мощности, превышающих $p_0 = P_0/S \approx 10^8$ Вт/см² [23], что на несколько порядков больше всех упоминавшихся в данной статье величин. В рассмотренном нами примере с излучателем мощностью 600 кВт и размером 1 м² поток мощности равен всего 60 Вт/см².

Необходимые требования к стабильности частоты источников излучения могут быть исчерпывающим образом удовлетворены применением системы фазовой автоподстройки частоты

ты (ФАПЧ) излучения, которая, как было продемонстрировано в работе [24], может обеспечить ширину спектра излучения гиротрона менее 1 Гц. Отметим, что столь высокая стабильность является излишней. Действительно, ширина спектральной линии по половине амплитуды в приземном слое атмосферы составляет около 3 ГГц для одиночной линии кислорода и около 6 ГГц для линии воды [9]. Полоса кислорода в окрестности частоты 60 ГГц, состоящая из нескольких десятков одиночных линий, контуры которых полностью сливаются при атмосферном давлении, простирается примерно от 50 до 70 ГГц. С ростом высоты, например до 20 км, столкновительная ширина линий уменьшается лишь в несколько раз. Поэтому для удержания частоты источника в нужных пределах (например, вблизи упоминавшейся выше точки равенства нулю реальной части отличия показателя преломления от единицы) достаточно обычной параметрической стабилизации, обеспечивающейся просто стабильностью температуры и источников питания. Возможные в этом режиме вариации частоты излучения в пределах нескольких мегагерц (см, например, рис. 1 из работы [24]) никак не скажутся на результате нагрева. По этой же причине облегчается и увеличение мощности излучения путём применения многих источников, частоты которых находятся в нужных пределах для конкретной атмосферной спектральной линии.

Важно отметить, что в предлагаемом нами способе возможно использование многих источников излучения без требования взаимной когерентности генерируемого ими излучения, т. е. без применения систем ФАПЧ. Увеличение числа источников даёт возможность увеличения и мощности, и сечения пучка излучения. При этом возможно использование опыта проекта ITER [25], в котором предусматривается одновременная работа 24 гиротронов мегаваттной мощности на частоте 170 ГГц. Разные источники в нашем случае ещё и могут быть настроены на частоты разных атмосферных спектральных линий, обладающих различными коэффициентами поглощения, для оптимизации распределения нагрева по высоте.

Оценки формы и параметров движения потока воздуха, создаваемого объёмным нагревом его столба, в общем случае затруднительны. Современный уровень расчётов в этой области отражён, например, в работах [19, 20, 26]. В них, в том числе, приводится анализ динамики конвективного подъёма локализованных в пространстве восходящих потоков в атмосфере. Отметим, что в этих работах восхождение потока рассматривается, как и в нашем случае, в спокойной атмосфере, без учёта влияния ветра и горизонтального сноса нагретого потока. Рассмотрение в работах [19, 20] поведения восходящего потока (plume) показывает, что даже в обычном случае турбулентного потока с нагревом от поверхности Земли угол расходимости вертикального потока и скорость вовлечения в поток окружающего воздуха приходится брать из экспериментальных данных. В связи с этим мы приводим цитату из лекций [20]: «Никто ещё не предложил теории, которая предсказала бы численное значение как угла, связывающего размер сечения (естественного конвективного) потока с расстоянием от поверхности, так и отношение скорости вовлечения к средней скорости подъёма». В рассматриваемом нами случае с нагревом в каждой точке потока расчёт только усложнится, а эксперимент отсутствует.

3. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕТКИ

Можно надеяться, что до определённого уровня мощности излучения характер вертикальных потоков в спокойной атмосфере сохранится. В пользу этого свидетельствуют одинаковые картины расходимости конвективных потоков от деревенской печи и от трубы завода (см. сноску 1). В данной работе мы рассматриваем именно спокойную атмосферу; это нередкий случай, и часто именно в таких условиях наблюдается смог. Сохранение характера потоков указывает на возможность «помощи» потокам из труб в преодолении слоя атмосферной инверсии описываемым способом при сравнительно небольших мощностях излучения.

При больших уровнях мощности излучения характер потока может измениться. Новый способ нагрева в каждой точке столба воздуха предположительно приведёт и к новым конвективным структурам, которые ещё предстоит рассчитать и смоделировать. Другим обстоятельством, осложняющим расчёт, является экспериментальный факт лёгкости закручивания восходящих потоков (см. сноску 1). Во многих случаях закручивание потока невидимо и становится видимым только благодаря языкам пламени, как в приведённых выше примерах, или искусственному добавлению дыма (см., например, демонстрацию самого большого рукотворного торнадо в музее Мерседес—Бенц, г. Штутгарт, сноска 1). Неустойчивость восходящих потоков к закручиванию отмечается в ряде расчётов и экспериментов [2, 4, 27–29]. Задача о конвекции для потока с нагревом по всей его протяжённости, насколько нам известно, не решалась никем.

Таким образом, полный расчёт параметров формы и движения потока отсутствует даже для более простого случая нагрева от поверхности; при нагреве в каждой точке вертикального столба воздуха неустойчивость к закручиванию, по-видимому, будет проявляться ещё сильнее. Общая картина восходящего потока будет сохраняться в том смысле, что столб тёплого воздуха в целом будет всплывать в более холодной окружающей атмосфере. Напомним, что всплывание будет происходить преимущественно вдоль нагретой области с небольшим поперечным расширением. При этом холодный воздух непосредственно над всплывающим потоком в установившемся режиме отсутствует. Это позволяет предположить, что поток будет центрироваться оптической осью луча, что должно лишь увеличить скорость его всплывания. Ландау [18] вывел пропорциональность радиуса восходящего потока с нагревом от поверхности Земли высоте его подъёма просто из соображений размерности при отсутствии других характерных размеров. В случае нагрева микроволновым излучением, кроме высоты, появляется ещё один размер — диаметр микроволнового луча. Как будут связаны эти величины, ещё предстоит узнать. Представляет интерес, например, исследование экспериментальной зависимости расходимости конвективного потока воздуха с высотой от мощности нагрева и угла расхождения микроволнового луча. Для уточнения деталей этого движения необходимы дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования, которые не являются предметом данной работы.

Возможность нагрева столба воздуха в каждой точке по всей высоте столба со скоростью, достигающей единиц градусов в секунду, показанная выше, является новой для атмосферных исследований. Нам неизвестны ни теоретические исследования, рассматривающие такую возможность, ни соответствующие эксперименты. По нашему мнению, постановка таких исследований представляет несомненный интерес как для физики атмосферы, так и, возможно, для практических применений. А в связи с тем, что в природе неизвестны восходящие потоки воздуха с нагревом по всей протяжённости потока, можно ожидать в эксперименте и проявления новых, не наблюдавшихся ранее форм конвективного движения в атмосфере.

Работа выполнена в рамках государственного задания (проект 0035–2019–0016).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dessens H., Vaillant J. // Comptes rendus de l'Academie des Sci. 1963. V. 256. P. 1818.
2. Dessens J. // Nature. 1962. V. 193, No. 4810. P. 13.
3. Church C. R., Snow J. T., Dessens J. // Bull. Am. Meteorological Soc. 1980. V. 61, No. 7. P. 682.
4. Snow J. T. // Rev. Geophys. 1987. V. 25. P. 371.
5. Benech B. // J. Appl. Meteorology Climatology. 1976. V. 15, No. 1. P. 127.
6. Кузнецов А. А., Конопасов Н. Г. Метеотрон. Кн. 1. Научно-исследовательский комплекс. Владимир.: Изд. ВлГУ, 2015. 167 с.

7. Кузнецов А. А., Конопасов Н. Г. Метеотрон. Кн. 2. Эксперименты. Наблюдения. Оценки. Регистрации. Владимир.: Изд. ВлГУ, 2015. 232 с.
8. Таунс Ч., Шавлов А. Радиоспектроскопия. М.: Изд. иностранной лит-ры, 1959. 756 с.
9. Третьяков М. Ю. Высокоточная резонаторная спектроскопия атмосферных газов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2016. 320 с.
10. Прандтль Л., Гидроаэромеханика. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая механика». 2000. 576 с.
11. Liebe H. J., Layton D. H. NTIA Report 87-224, Millimeter-Wave Properties of Atmosphere: Laboratory Studies and Propagation Modeling, Institute for Telecommunication Studies, Boulder, CO, US Department of Commerce, 1987. 84 p.
12. Shively J. F., Bier R. E., Caplan M., et al. // Final Report 60 GHz Gyrotron Development Program 1979–1984. ORNL/Sub/79-21453/21. Varian Associates, Inc., Palo Alto, CA (USA), 1986. 707 p.
13. <https://www.osti.gov/biblio/5626572>.
14. Karya T., Imai T., Minami R., et al. // Nuclear Fusion. 2017. V. 57, No. 6. Art. no. 066001.
15. Nusinovich G. S., Thumm M. K. A., Petelin M. I. // J. Infrared Milli. Terahz. Waves. 2014. V. 35, No. 4. P. 325.
16. Kasugai A., Sakamoto K., Takahashi K., et al. // Nuclear Fusion. 2008. V. 48, No. 5. Art. no. 054009.
17. Богданов С. Н., Бурцев С. И., Иванов О. П., Куприянова А. В. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: Справ. / Под ред. С. Н. Богданова. 4-е изд., перераб. и доп. СПб.: СПбГАХИТ, 1999. 320 с.
18. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 736 с.
19. Cushman-Roisin B. Environmental Fluid Mechanics. NY: John Wiley & Sons, 2019. 161 p.
20. <http://www.dartmouth.edu/cushman/courses/engs151/lectures.html>.
21. Антаков И. И., Белов С. П., Герштейн Л. И. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 19, № 10. С. 634.
22. Шмелер С. М. Инверсии температуры. Большая Советская Энциклопедия / Под ред. А. М. Прохорова, Изд. «Советская энциклопедия», третье изд., 1972. Т. 10. С. 176.
23. Белов С. П., Буренин А. В., Герштейн Л. И. и др. // Оптика и спектроскопия. 1973. Т. 35, № 2. С. 295.
24. Fokin A. P., Glyavin M. Yu., Golubyatnikov G. Yu., et al. // Nature Sci. Rep. 2018. V. 8. Art. no. 4317.
25. <https://www.iter.org/newsline/-/2112>.
26. Черногор Л. Ф. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54, № 6. С. 626.
27. Onishchenko O., Pokhotelov O., Horton W., Fedun V. // Ann. Geophys. 2015. V. 33, No. 11. P. 1343.
28. Onishchenko O. G., Horton W., Pokhotelov O. A., Fedun V. // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 2016. V. 121, No. 19. P. 11264.
29. Horton W., Miura H., Onishchenko O., et al. // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 2016. V. 121, No. 12. P. 7197.

Поступила в редакцию 24 сентября 2018 г.; принята в печать 30 апреля 2019 г.

**VOLUME HEATING OF THE VERTICAL AIR COLUMN BY MICROWAVE
RADIATION IN THE ATMOSPHERIC ABSORPTION LINE***A. F. Krupnov and M. Yu. Tretyakov*

We propose a method of volume heating of the vertical air column by the vertically directed microwave radiation at the frequency of the spectral atmospheric-absorption line. The heating efficiency for the case of the molecular-oxygen absorption band near a frequency of 60 GHz is estimated. The proposed heating method can lead to formation of new convection structures in an air column. Absence of the natural ascending airflows with stationary heating over the entire flow length is noted.