

УДК 551.509.6

## СОЗДАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ ВОСХОДЯЩИХ ПОТОКОВ В АТМОСФЕРЕ С ПОМОЩЬЮ МНОГОУРОВНЕВОГО УСТРОЙСТВА

В. П. Павлюченко

*Представлен метод создания восходящего потока воздуха в атмосфере путем его подогрева на многих уровнях от гирлянды привязных аэростатов с зачерненными баллонами. Их поверхности нагреваются Солнцем и передают тепло воздуху, а расположенные на ярусах заземленные эмиттеры насыщают его заряженными ионами в качестве центров конденсации. Основные задачи – образование облаков, стимулирование осадков и очистка приземного воздуха от загрязнений.*

**Ключевые слова:** метеорология, искусственные осадки, восходящие потоки, приземные загрязнения, солнечная радиация, центры конденсации, ионы.

Основой образования осадков является конденсация атмосферного пара при его охлаждении до точки росы [1]. В атмосфере всегда есть влага, в среднем над каждым квадратным метром земной поверхности находится 28 кг влаги, в том числе до 25 кг над пустынями и полупустынями. В условиях малооблачного антициклона охлаждение воздуха обычно происходит в восходящих потоках, поскольку температура в поднимающемся ненасыщенном воздухе падает на 10 К/км. Сама атмосфера получает тепло от подстилающей поверхности, нагреваемой Солнцем, поэтому из-за разности температур разных участков могут возникать локальные восходящие потоки нагретого воздуха, так как он легче холодного. Воздух устремляется вверх с ускорением

$$a = -g \times \Delta\rho/\rho = g \times \Delta T/T \quad (1)$$

за счет силы Архимеда. Здесь  $g$  – ускорение свободного падения,  $\rho$  – плотность воздуха,  $T$  – абсолютная температура. При достаточно высокой начальной температуре и влажности поднимающийся воздух иногда успевает охладиться до точки росы. Тогда начинается конденсация пара на аэрозолях или заряженных ионах [2], постоянно образующихся в глубине атмосферы космическими лучами.

С 1960-х годов для искусственного создания восходящих потоков и конденсации облаков с выпадением осадков даже при изначально безоблачном небе применялись огневые метеотроны со сжиганием нефтепродуктов [3]. Более экологически чистым является солнечный метеотрон [4], нагревающий воздух от наземной поверхности большой площади, зачерненной искусственно. Этот механизм, несомненно, работает в естественных условиях при достаточной влажности воздуха и отсутствии температурных инверсий. В антициклоне нагретый у земли восходящий поток чаще всего затухает из-за адиабатического охлаждения, турбулентного перемешивания с холодным воздухом, недостаточной влажности и мощности начального нагрева.

Наш метод использует солнечное излучение для нагрева многоуровневой системы привязных аэростатов с зачерненными баллонами, которые отдают тепло воздуху и создают восходящий поток свободной конвекции. Отличительные свойства метода:

– Используется Солнце – мощный, экологически чистый и повсеместно доступный источник энергии, формирующий погоду в естественных условиях. В малооблачную погоду в полдень нагрев зачерненной поверхности со всех сторон около  $1 \text{ кВт/м}^2$ .

– Многоуровневая система оптимальна для подогрева потока – нагретый воздух требуется поднять до следующего уровня, а не сразу до уровня конденсации.

– Полная экологическая чистота из-за отсутствия расходных материалов. Восходящие потоки являются универсальным инструментом для локального улучшения экологии путем стимулирования облачности и осадков, вентиляции и удаления приземных загрязнений, в том числе тепловых, через слои температурной инверсии.

– Низкая себестоимость является следствием простоты конструкции.

Установка Гелиатор-1 (рис. 1) состоит из зачерненных баллонов, заполненных гелием и объединенных системой тросов в расположенные друг над другом ярусы.

Ярус в виде тора образован согнутым по окружности цилиндрическим рукавом, прикрепленным к раме. Между рамой и ее центром натянуты провода-спицы, играющие также роль излучателей электронов путем коронного разряда – разряда вблизи электродов с малым радиусом кривизны в резко неоднородном электрическом поле. Поле в нижней атмосфере составляет около  $100 \text{ В/м}$  [7], поэтому с заземленного аэростата на высоте 300 м путем коронного разряда экспериментально была получена мощность до  $0.7 \text{ кВт}$  в спокойной атмосфере [8], что в тысячи раз увеличивает вблизи эмиттеров число однозарядных ионов в воздухе – эффективных центров конденсации. Для уменьшения радиуса кривизны эмиттеров на спицах закрепляется металлизированная пленка типа майлар с металлическим слоем толщиной около  $1 \text{ мкм}$ .

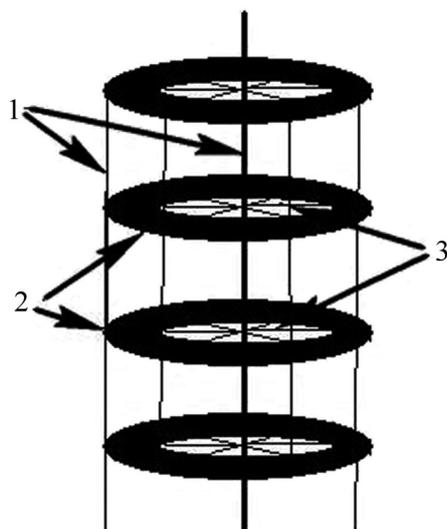


Рис. 1: Схема Гелиатор-1 [5]. 1 – силовые тросы, один трос заземлен, 2 – зачерненные баллоны с гелием, 3 – проводящие заземленные спицы.

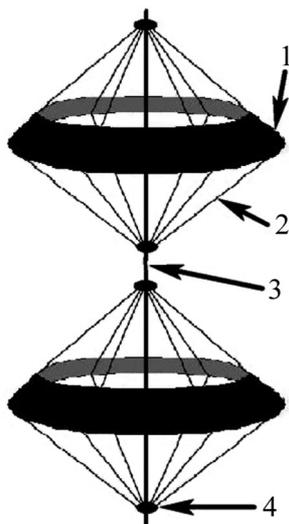


Рис. 2: Схема Гелиатор-2 [6]. 1 – поверхность конуса, 2 – спицы-стропы, 3 – центральный трос, 4 – втулка.

Баллоны нагреваются Солнцем и отдают тепло воздуху, создавая в каждом ярусе кольцевой факел свободной конвекции. Теплый воздух поднимается до следующего яруса, и процесс повторяется на всех уровнях вплоть до верхнего. Высота между ярусами подбирается так, чтобы воздух в потоке не успел остановиться до следующего яруса. Вдоль вертикальной оси установки формируется восходящий поток нагретого в

контролируемых условиях воздуха в виде гибкого ствола необходимой высоты. В итоге происходит очистка приземной зоны от загрязнений, и эти загрязнения, будучи подняты вверх, вместе с ионами играют положительную роль в качестве центров конденсации.

Размеры ярусов, их число, расстояния между ними, высота нижнего и верхнего определяются метеоусловиями и поставленной задачей (искусственные осадки, очистка воздуха и др.). К недостаткам устройства можно отнести громоздкость, потребность в большом количестве гелия и сложности работы при боковом ветре.

Гелиатор-2 (рис. 2) более эффективен и технологичен. В нем сохраняется принцип многоярусного подогрева воздуха, но добавлена возможность закручивания восходящего потока, улучшена система монтажа и подъема установки. Здесь каркас состоит из кольцевого обода со стропами-спицами, натянутыми между ободом и двумя разнесенными вдоль центрального троса втулками. На ярусах закреплен черный материал (нагреватель) в виде поверхности усеченного конуса, отдающий тепло потоку, причем в теплообмене участвуют обе поверхности материала. Первые ярусы при слабом ветре поднимаются с помощью баллонов, заполненных гелием, при усилении ветра может использоваться метод “воздушного змея”. Когда восходящий поток достигает скорости 2–3 м/сек, он сам поднимает следующие ярусы.

Восходящий воздух и боковой ветер создают поток через ярус, который натягивает трос силой аэродинамического сопротивления, поэтому направления троса и потока совпадают. Именно двухточечное крепление яруса и разнесение втулок заставляют плоскость обода быть всегда перпендикулярной к тросу, а коническая форма способствует центрированию троса вдоль оси потока.

Обод нижнего яруса собирается из легких трубок, состыкованных друг с другом и согнутых по окружности. В центре устанавливается монтажная труба, через которую проходит центральный трос от лебедки. Трос должен быть изолятором (капрон, кевлар) и хорошо закреплен с применением дублирования. Заземление проходит отдельно. На трубу надевается нижняя втулка и протягивается нижний ряд капроновых строп-спиц между ней и ободом, затем надевается верхняя втулка, и к ней из тех же точек обода протягиваются стропы-спицы верхнего ряда, а на них закрепляется нагреватель. Длина строп превышает радиус обода, чтобы обеспечить раствор конуса примерно  $45^\circ$ . На стропы закрепляются эмиттеры в виде полос майлара с бахромой. При необходимости втулки позволяют ярусу вращаться вокруг центрального троса. Следующий ярус собирается аналогично, но радиус его обода больше на несколько сантиметров так, чтобы в него соосно входил предыдущий ярус. Стропы с нагревателем укладываются поверх

предыдущего яруса, позволяя ободу последующего ложиться плотно на землю. Так, последовательно ярус за ярусом, монтируется вся установка в виде плоского слоя минимальной высоты из телескопически вложенных друг в друга ярусов. На первый слой возможно наложение других слоёв, принципиальных ограничений на число ярусов нет.

Подъем установки начинается с вытягивания через монтажную трубу центрального троса с помощью баллонов или воздушного змея, на тросе закрепляется верхняя втулка самого верхнего яруса. Трос продолжает вытягиваться, натягиваются верхние спицы с нагревателем и поднимают обод яруса. Оператор придерживает нижнюю втулку яруса до натяжения нижних спиц, затем закрепляет ее на тросе. Аналогично, через заданный промежуток, определяемый профилем атмосферы, на тросе закрепляются второй и все последующие ярусы. При необходимости на трос устанавливаются неподвижные крыльчатки. Они имеют небольшой диаметр, расположены на оси потока и только синхронизируют зарождение вихря, а полную энергетику ему обеспечивает ускоренное движение потока. Опускание установки производится в обратном порядке.

Для упрощенной оценки энергетических характеристик зададим округленные числа, близкие к реальным. Пусть высота уровня конденсации 1000 м, такую же высоту имеет Гелиатор-2 с 70 ярусами, средняя поступающая от Солнца на каждый ярус (площадью  $100 \text{ м}^2$ ) мощность 100 кВт, средняя площадь сечения восходящего потока  $S = 500 \text{ м}^2$ , в потоке все скорости  $V$  равны, средняя плотность воздуха  $\rho = 1 \text{ кг/м}^3$ , ускорение свободного падения  $g = 10 \text{ м/сек}^2$ , теплоемкость воздуха при постоянном давлении  $C_p = 1 \text{ кДж/(К} \cdot \text{кг)}$ , атмосфера стандартная без ветра с падением температуры  $\gamma = 6.5 \text{ К/км}$ .

Рассмотрим один ярус, производительность которого равна потоку массы воздуха через его горизонтальную плоскость

$$dM/dt = \rho V S. \quad (2)$$

На подъем массы  $M$  на высоту  $h$  в поле тяжести надо затратить энергию

$$E = Mgh. \quad (3)$$

При адиабатическом подъеме ненасыщенного влагой воздуха с использованием сил Архимеда работа выполняется за счет внутренней энергии (тепла) воздуха

$$E = MC_p \Delta T \quad (4)$$

или мощности

$$W = dE/dt = (dM/dt)C_p \Delta T. \quad (5)$$

Приравняв (4) и (3) и считая температуры внутри потока и вне его, близкими ( $T_{\text{in}}/T_{\text{ext}} \approx 1$ ), получим градиент сухой адиабаты [1, стр. 17]

$$\gamma_{\text{adiab}} = \Delta T/h = g/C_p = 10 \text{ К/км.} \quad (6)$$

Разность температур

$$\Delta T = (\gamma_{\text{adiab}} - \gamma)h \quad (7)$$

показывает, насколько поднявшийся воздух будет холоднее атмосферы на высоте  $h$ , и на эту величину его надо предварительно нагреть. Тогда на высоте  $h$  температуры потока и атмосферы сравняются, ускорение прекратится, но накопленный импульс потока сохранится. Подставим (7) в (5) и вычислим мощность, затраченную на поток (2) через ярус

$$W = dE/dt = (dM/dt)C_p\Delta T = \rho V S C_p(\gamma_{\text{adiab}} - \gamma)h, \quad (8)$$

и, учтя (6), получим среднюю скорость потока

$$V = W/[(g - \gamma C_p)h\rho S]. \quad (9)$$

Один ярус при подъеме воздуха до следующего яруса на  $h = 1000/70 = 14.3$  м обеспечивает среднюю скорость 4 м/сек и производительность 2000 кг/сек. Такую же среднюю скорость и производительность поддерживает Гелиатор-2 высотой 1 км, если считать, что он состоит из одного наземного яруса мощностью  $70 \times 100 \text{ кВт} = 7 \text{ МВт}$ , а весь воздух поступает с уровня земли. Это полный аналог наземного солнечного метеотрона с мощностью  $14 \text{ кВт/м}^2$ , в 14 раз превышающей естественный нагрев. Реально средняя высота подъема воздуха в Гелиаторе меньше 1 км, а производительность на выходе, по крайней мере, в два раза больше благодаря постоянной подпитке потока внешним воздухом на всех высотах через его боковую поверхность из-за вихревого ускоряющегося движения. Ускорение обеспечивается многоуровневым подогревом и суммированием накопленной теплоты и импульса потока от предыдущих ярусов.

Скорость потока (9) зависит от атмосферного температурного градиента  $\gamma$ . Чем больше градиент, тем менее устойчива атмосфера, тем выше скорость потока, и тем больше энергии вкладывает сама атмосфера в его развитие. Так, при  $\gamma = 8 \text{ К/км}$  средняя скорость 7 м/сек, при  $\gamma = 9 \text{ К/км}$  скорость 14 м/сек, а при  $\gamma > 10 \text{ К/км}$  восходящие потоки зарождаются и развиваются самостоятельно без дополнительного подогрева.

Поток в Гелиаторе способен также развиваться со скоростью 1.4 м/сек в случае температурной инверсии с  $\gamma = 0$ . Для преодоления более сильных инверсий можно уменьшить расстояния между ярусами или увеличить площади нагрева в зоне инверсии.

Давление восходящего потока на ярус

$$F = C_y \rho V^2 / 2. \quad (10)$$

Оно равно 5 Н/м<sup>2</sup> при скорости восходящего потока  $V = 4$  м/сек и коэффициенте  $C_y \approx 0.6$ , учитывающим коническую форму нагревателя. На ярус площадью 100 м<sup>2</sup> действует подъемная сила 500 Н, а на 70 ярусов – 35000 Н, что примерно в два раза превышает вес самой установки (1–2 тонны) и обеспечивает ей достаточную плавучесть. Эта же сила по третьему закону Ньютона тормозит поток, и если её умножить на среднюю скорость, то получим 140 кВт, тормозящие поток, или 2% мощности Гелиатора. Но даже это не уменьшает производительность, зависящую только от полной мощности и разности температур низа и верха, а только формирует поток в виде расширяющегося конуса.

Из объема установки при установившемся процессе энергия уходит только с потоком воздуха вверх и с тепловым излучением. Его величина определяется законом Стефана–Больцмана и составляет 6% полной мощности Гелиатора при превышении температуры нагревателя над внешним воздухом на 10 К и 14% при сильном превышении на 20 К. В итоге подавляющая часть поступившей от Солнца мощности идёт на подогрев и ускорение восходящего потока. Это естественно, так как любая энергия, в конце концов, идет на нагревание среды, что и требуется для восходящего потока.

Через верхнюю плоскость установки в стандартной атмосфере выходит не менее 4000 м<sup>3</sup>/сек воздуха с абсолютной влажностью 10–40 г/м<sup>3</sup>, который растекается в стороны и охлаждается. Начинается конденсация пара на ионах и аэрозолях. Если принять, что конденсируется  $\approx 5$  г/м<sup>3</sup>, то образуется  $\approx 20$  кг/сек конденсата в облаке за счет поднятого установкой восходящего потока, при этом воздух нагревается на 10 К за счет теплоты фазового перехода. Нагрев растянут на сотни и тысячи метров по высоте при постоянной подпитке облака Гелиатором. Формируется, как и в естественных условиях, кучевое облако вертикального развития. При конденсации 20 кг/сек тепловыделение в облаке составит 45 МВт, расходуемых на нагрев и подъем воздуха. Это дополнительно ускоряет начинающийся у земли вихревой восходящий поток за счет тяги в кучевом облаке, увеличивая его эффективный радиус и производительность, улучшая его устойчивость и помогая преодолевать задерживающие слои антициклона.

*Заключение.* Система Гелиатор предназначена для стимулирования восходящих потоков с целью увеличения осадков и очистки приземного воздуха. Основные свойства метода – экологическая чистота, простота конструкции, возможность многократного использования, отсутствие расходных материалов и ополнительных источников энергии.

Работа выполнена при поддержке Национального центра метеорологии Абу-Даби, ОАЭ, в рамках Программы научных исследований ОАЭ по увеличению осадков, грант No APP-REP-2017-02120.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] *Атмосфера, Справочник*, под ред. Ю. С. Седунова (Л., Гидрометеиздат, 1991).
- [2] Дж. Вильсон, *Камера Вильсона*, пер с англ. (М., ИЛ, 1954).
- [3] Н. И. Вульфсон, Л. М. Левин, *Метеотрон как средство воздействия на атмосферу* (М., Гидрометеиздат, 1987).
- [4] В. А. Орановский, Патент RU №2071243, 1994.
- [5] В. П. Павлюченко, Патент RU 2462026, Бюллетень “Изобретения. Полезные модели”, № 27, 2012.
- [6] В. П. Павлюченко, Патент RU 2670059, Бюллетень “Изобретения. Полезные модели”, № 29, 2018.
- [7] В. И. Герасименко, *Электрические и метеорологические поля нижней тропосферы. Атмосферное электричество* (Л., Гидрометеиздат, 1976).
- [8] Н. Plauson, Patent US 1540998 A, 6-09-1925.

Поступила в редакцию 4 апреля 2019 г.

После доработки 15 апреля 2019 г.

Принята к публикации 15 апреля 2019 г.