

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ТЕЧЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛ КОРИОЛИСА

В. Н. Макаров, С. А. Горбунов, К. В. Баутин, С. П. Баутин

На основе анализа восходящих закрученных потоков предложен статистический метод линейного планирования экспериментов для исследования влияния сил Кориолиса, обусловленных влиянием вращения Земли на атмосферный воздух. Результаты проведенных экспериментальных исследований подтверждают возможность использования энергии циркуляции атмосферного воздуха, получаемой им от действия сил Кориолиса для разработки нетрадиционных источников возобновляемой энергии для повышения экономической эффективности горнорудных предприятий. Оптимизация геометрических параметров предложенного устройства позволяет разработать вихрегенератор энергии, использующий неограниченные возможности энергетического воздействия сил Кориолиса на восходящие воздушные потоки от вентиляторов главного проветривания.

**Ключевые слова:** циркуляция; атмосферный воздух; сила Кориолиса; восходящие закрученные потоки; вентилятор главного проветривания.

В настоящее время в связи с ростом энергоемкости горнорудных предприятий уделяется существенное внимание разработке источников возобновляемой энергии. Большими потенциальными возможностями в этом направлении располагают восходящие закрученные потоки (ВЗП) воздуха, создаваемые вентиляторами главного проветривания (ВГП). В природе такие явления известны как смерчи, торнадо и тропические циклоны, регулярно наблюдаемые в ряде регионов Земли. На рис. 1 приведена фотография одного типичного торнадо над водой.

В [1, 2] предложены модели возникновения и устойчивого существования ВЗП, подтвержденные как математическим моделированием [1, 2], так и результатами экспериментов [3]. Показано [1, 2, 4], что в случае существования достаточно длительного по времени восходящего потока воздуха и, как следствие, радиального движения воздуха в придонной области вращения Земли посредством силы Кориолиса придает существенную окружную скорость частицам воздуха в придонной части ВЗП.

Создание стабильного вертикального



Рис. 1. Фотографии торнадо с возникающей и растущей вниз воронкой

стока в лабораторных условиях возможно несколькими способами, например: нагрев плоской поверхности, как это было реализовано в экспериментах группы А. Ю. Вараксина [3]; использование вертикальной трубы фиксированного радиуса с вентилятором вытяжного действия с регулируемой скоростью тяги, направляющей воздух снизу вверх. Для

данных условий применим термин «свободный ВЗП», поскольку в эксперименте нет никакой предварительной или принудительной закрутки воздуха.

В настоящей работе исследовалась возможность создания стабильного окружного движения воздуха в придонной части ВЗП с применением вертикальной трубы с вентиля-

тором вытяжного действия, направляющим воздух снизу вверх. Одновременно осуществлялся выбор параметров геометрии установки и кинематики потока воздуха, позволяющих в условиях существенного влияния вязкости обеспечить устойчивую закрутку потока воздуха за счет действия силы Кориолиса, вызванной вращением Земли.

В реальных условиях ВЗП создается ВГП. Для создания стабильного ВЗП в лабораторных условиях была использована непроницаемая для воздуха вертикальная цилиндрическая труба. Соотношение длины трубы и ее диаметра, а также высота придонной части и расстояние от верхнего среза трубы до потолка экспериментальной лаборатории определялись на основании расчетов из [1, 2].

На рис. 2 изображена схема экспериментальной установки: 1 – вытяжной вентилятор с регулируемой скоростью вращения, стационарно закрепленный на верхнем срезе вертикальной цилиндрической трубы 2, нижним срезом прикрепленной к сплошной горизонтальной плоскости 4 по окружности кругового отверстия 5 в геометрическом центре этой плоскости; 3 – опоры, поддерживающие плоскость 4 над поверхностью пола 6 помещения, в котором проводится эксперимент.

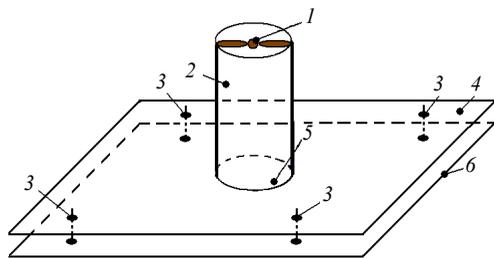


Рис. 2. Установка для формирования устойчивого восходящего закрученного потока

При описании схем экспериментов используется цилиндрическая система координат  $(r, \varphi, z)$ , где  $r$  – расстояние от оси трубы в горизонтальном направлении;  $\varphi$  – полярный угол в плоскости пола, отсчитываемый от оси, направленной на восток, против хода часовой стрелки, т. е. в положительном направлении;  $z$  – расстояние от поверхности пола в вертикальном направлении. При описании результатов экспериментов использованы проекции вектора скорости воздуха на оси цилиндрической системы координат:  $u$  – радиальная,  $v$  –

окружная,  $w$  – вертикальная.

Для реализации в эксперименте способа «обогреваемой струны» для высокоточного изменения скорости потока воздуха в радиальном, окружном, вертикальном направлениях были использованы два термоанемометра «Testo 425» (серийные номера 02419555 и 02419541), соответствующие ГОСТ 6651–2009.

Основные технические характеристики термоанемометров «Testo 425» следующие: диапазон измерения скорости воздушного потока 0...20 м/с; разрешение 0,01 м/с; точность 0,03 м/с; температурный диапазон эксплуатации  $-20...+50$  °С.

В первой серии экспериментов измерения производились для пяти значений  $z$ : 0,37; 0,35; 0,25; 0,14; 0,02 м. В придонном слое замеры значений компонент вектора скорости (радиальной и окружной) производились по четырем азимутам: восточному ( $\varphi = 0$ ), северному ( $\varphi = \pi/2$ ), западному ( $\varphi = \pi$ ), южному ( $\varphi = 3\pi/2$ ); на расстояниях от оси трубы  $r$ : 0,035; 0,135; 0,235 м.

Варьирование напряжения на вентиляторе позволило изменять вертикальную скорость в трубе  $w$  в диапазоне 0,37...0,8 м/с. При этом значения окружной скорости  $v$  в придонной части и в трубе фиксировались в пределах 0,1...0,23 м/с.

Визуализация направления закрутки воздуха производилась разными способами: с помощью слабого дымового потока в придонной части и с помощью цветной нитки, помещенной внутрь трубы. Дополнительно направление закрутки воздуха определялось с помощью измерительного зонда термоанемометра. Поскольку рабочая часть зонда спроектирована для реализации принципа «обогреваемая струна», через нее предусмотрено сквозное прохождение воздуха. Поэтому заклеивание одной из сторон рабочей части приводит к разности показаний термоанемометра при обращении навстречу воздушному потоку заклеенной и незаклеенной стороной. В случае, если эта разность превышает порог точности термоанемометра, можно сделать вывод о направленности воздушного потока.

Анализ результатов, полученных в первой схеме экспериментов, позволяет сделать следующие выводы: в придонной части воз-

никает закрутка воздуха всегда в положительном направлении, которая передается и в восходящую часть потока, что полностью согласуется с теорией [1–4] и результатами экспериментов группы А. Ю. Варакина [3]; максимальное значение окружной скорости  $v$  (до 0,23 м/с) зафиксировано как в придонной, так и в вертикальной части потока; движение воздуха в придонной части является нестационарным и трехмерным; в значениях компонент вектора скорости наблюдается определенная немонотонность по времени в фиксированных точках пространства; в середине вертикального потока воздуха амплитуда колебаний вертикальной и окружной компонент вектора скорости не превышает порога точности термоанемометра, что можно трактовать как стационарность газодинамических характеристик потока воздуха в трубе; значимое движение воздуха, включая его закрутку, зафиксировано практически по всей высоте придонного слоя; воздушное течение в самой верхней части придонного слоя зависит от  $r$  и от  $\varphi$ , причем с увеличением расстояния  $r$  зависимость от полярного угла  $\varphi$  практически пропадает.

Во второй схеме экспериментов замеры производились на высоте  $z = 0,012 \dots 0,014$  м от поверхности пола; расстояния от оси трубы  $r$  составляли 0,03...0,5 м. В придонном слое замеры значений компонент вектора скорости (радиальной и окружной) производились по четырем азимутам: восточному ( $\varphi = 0$ ), северному ( $\varphi = \pi/2$ ), западному ( $\varphi = \pi$ ), южному ( $\varphi = 3\pi/2$ ). Варьирование напряжения на вентиляторе позволило изменять вертикальную скорость в трубе  $w$  в диапазоне 0,46...1,1 м/с. При этом значения окружной скорости  $v$  в придонной части и в трубе фиксировались в пределах 0,1...30,27 и 0,16...0,38 м/с соответственно. Направление закрутки воздуха в придонной части было определено как положительное. В процессе второй серии экспериментов был проведен временный демонтаж экспериментальной трубы. При этом закрутка воздуха непосредственно у поверхности пола сохранилась, окружная компонента скорости убывала в течение 35 мин от 0,38 до 0,07 м/с.

Анализ результатов, полученных во второй серии экспериментов, позволяет сделать следующие выводы: отсутствие горизонталь-

ной плоскости практически не сказывается на формировании воздушного потока в придонной части и на зависимости окружной компоненты скорости воздушного потока от вертикальной скорости воздуха в трубе; направление закрутки воздуха является положительным; исчезновение вертикального стока, контактной поверхности и радиальной компоненты вектора скорости воздуха в придонной части не приводит к моментальному исчезновению закрутки воздуха в придонной части.

Полученные экспериментальные данные полностью согласуются с теоретическими результатами, строго установленными для задачи о стоке [1, 2, 5, 6]: поскольку эксперименты проведены в Северном полушарии, то при наличии вертикального стока течение воздуха в придонной части закручивается вокруг основания стока в положительном направлении. В [1, 2] приведена система обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} c' = -\frac{(\gamma-1)}{2} c \frac{[u^2 + a^2(r_{in}^4 - r^4)/(4r^2)]}{r(u^2 - c^2)}; \\ u' = u \frac{[c^2 + a^2(r_{in}^4 - r^4)/(4r^2)]}{r(u^2 - c^2)}, \end{cases}$$

решения которой – функции  $c(r)$ ,  $u(r)$  – вместе с функцией

$$v(r) = \frac{a(r_{in}^2 - r^2)}{2r}$$

описывают скорость звука, радиальную и окружную составляющие вектора скорости воздуха в бесконечно тонком придонном слое.

Однако эксперимент показал, что движение воздуха в придонном слое является трехмерным и нестационарным. При этом средние характеристики потока воздуха достаточно стабильны и близки по своим значениям к решениям приведенной системы обыкновенных дифференциальных уравнений при соответствующих значениях входных параметров. Заметим, что на сегодняшний день отсутствуют надежные математические расчеты закрученных течений в придонном слое в случае его конечной ненулевой высоты.

Значения окружной скорости движения

воздуха напрямую зависят от величины вертикальной скорости стока: увеличение вертикальной скорости воздуха в трубе всегда приводит к увеличению окружной компоненты вектора скорости как в придонной, так и в вертикальной части потока.

Течение в придонной части практически не зависит от того, имеется ли горизонтальная плоскость, ограничивающая сверху придонный слой. На первом этапе движение воздуха возникает на уровне нижнего среза трубы, с течением времени оно фиксируется по всей высоте придонного слоя.

На рис. 3 приведены зависимости увеличения толщины закрученного атмосферного воздуха с течением времени, где  $t$  – безразмерное значение времени,  $t = t^*/24$ ,  $t^*$  – размерное значение времени,  $\tau$ ;  $h$  – безразмерная высота вращающегося слоя,  $h = h^*/(2r_0)$ ,  $h^*$ ,

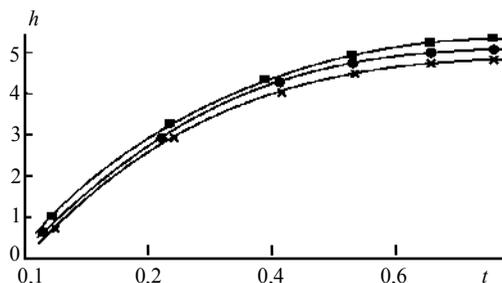


Рис. 3. Зависимость изменения толщины закрученного атмосферного воздуха от времени действия силы Кориолиса

$r_0$  – размерные значения (м) высоты вращающегося

слоя и радиуса трубы соответственно; номера кривых соответствуют разным сериям экспериментов.

Наличие стока приводит к устойчивому и непрерывному увеличению толщины придонного слоя, что соответствует росту энергии вращающейся части потока с течением времени.

Несмотря на влияние сил вязкости, существует величина скорости стока, при которой достигается равновесное состояние энергии, затрачиваемой на создание устойчивого стока и прироста энергии вращающейся придонной части от действия сил Кориолиса. В условиях проведенного эксперимента эта скорость соответствует скорости устойчивого вращения воздуха в придонном слое.

Таким образом, проведенные исследования и данные натурных наблюдений за восходящими потоками, создаваемыми ВГП, торнадо и тропическими циклонами, дают основания предполагать, что при оптимизации геометрических и кинематических параметров опытных установок можно добиться устойчивой положительной разности между энергией потока, вращающегося в придонной части, и энергией, затраченной на создание устойчивого стока. Изложенное свидетельствует о возможности создания вихревых генераторов энергии за счет использования взаимодействия энергии вращения Земли и восходящих потоков, создаваемых ВГП.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баутин С. П. Торнадо и сила Кориолиса. Новосибирск: Наука, 2008. 96 с.
2. Баутин С. П., Обухов А. Г. Математическое моделирование разрушительных атмосферных вихрей. Новосибирск: Наука, 2012. 152 с.
3. Вараксин А. Ю., Ромаш М. Э., Копейцев В. Н. Торнадо. М.: Физматлит, 2011. 154 с.
4. Баутин С. П., Крутова И. Ю. Закрутка газа при плавном стоке в условиях действия сил тяжести и Кориолиса // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50, № 3. С. 473–475.
5. Баутин С. П., Обухов А. Г. Математическое моделирование и численные расчеты течений в придонной части тропического циклона // Вестник Тюмен. гос. ун-та. 2012. № 4. С. 175–182.
6. Обухов А. Г. Математическое моделирование и численные расчеты течений в придонной части торнадо // Вестник Тюменского государственного университета. 2012. № 4. С. 183–188.

Поступила в редакцию 15 мая 2013 г.

**Макаров Владимир Николаевич** – профессор, доктор технических наук, начальник Управления инноватики и развития. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: Uk.intelnedra@gmail.com

**Баутин Сергей Петрович** – доктор физико-математических наук профессор кафедры высшей прикладной математики. 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66, Уральский государственный университет путей сообщения.

**Баутин Константин Викторович** – доцент, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник. 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66, Уральский государственный университет путей сообщения.

**Горбунов Сергей Андреевич** – аспирант, начальник отдела трансфера и технологий. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет.