

ЛИНЕАРИЗАЦИЯ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛНОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА

А. А. Бугаенко^{1, 2}, И. Ю. Крутова²

¹ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

²ФГАОУ ВО «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Снежинск, Россия

Согласно предложенной в монографии [1] схеме возникновения и устойчивого существования восходящего закрученного потока (ВЗП) основными причинами устойчивого функционирования ВЗП являются: существование достаточно длительного по времени восходящего потока воздуха; вращение Земли, которое через действие силы Кориолиса придает существенную окружную скорость частицам воздуха в придонной части ВЗП. В статье описываются численные исследования по созданию стабильного окружного движения воздуха в придонной части ВЗП с применением вертикальной трубы с вентилятором вытяжного действия, направляющим воздух по трубе снизу вверх [2]. Численный расчет подобных течений газа позволяет дать конкретные предложения и рекомендации по возможному проведению крупномасштабного эксперимента по закрутке больших масс воздуха.

В данной статье рассматривается линеаризация [3] полной системы уравнений Навье-Стокса (ПСУНС), в которой учтены сжимаемость газа и диссипативные эффекты вязкости и теплопроводности так, что общие законы сохранения массы, импульса и энергии выполняются. И выполняются законы термодинамики, благодаря учету уравнений состояния.

Также в статье рассматривается численное исследование системы при соответствующих начальных и граничных условиях. Расчетная область представляет собой прямоугольный параллелепипед, размеры которого соответствуют размерам разных по интенсивности ВЗП [4]. Его нижняя грань совпадает с поверхностью Земли. Через квадратное отверстие в центре верхней грани расчетной области моделируется вертикальный плавный продув воздуха.

На рис. 1. представлены результаты расчетов плотности, температуры, третьей и второй компонент вектора скорости газа на высоте 0,25 м для двух различных моментов расчетного времени (0,1 и 30 с), а также линии тока при численном моделировании течений в ВЗП малых масштабов.

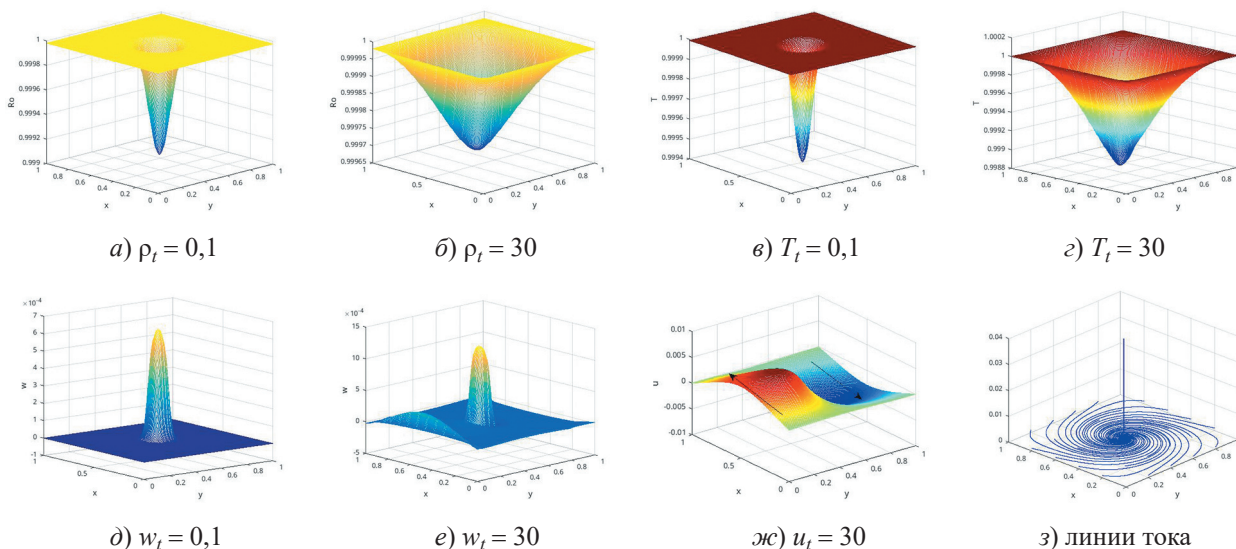


Рис. 1. Газодинамические характеристики течений в ВЗП малых масштабов

Плотность газа по периметру расчетной области сохраняется постоянной и равной значению плотности стационарного распределения. В начальные моменты наблюдается плавное понижение плотности в центре расчетной области. При увеличении времени расчета процесс изменения плавно выходит на стационарный режим. Поверхность плотности газа приобретает вид воронки.

Несмотря на продув газа через верхнее отверстие, в результате численного решения линеаризованной ПСУНС отмечается также понижение температуры в центре расчетной области под отверстием продува. Периферийное же значение температуры соответствует постоянному значению начального стационарного распределения.

По мере приближения к центру расчетной области прослеживается осевая симметрия.

Особенностями в поведении вертикальной компоненты скорости частиц газа в расчетной области является близость ее значений к нулю во всех периферийных областях. В области продува вертикальная скорость постепенной растет в соответствии с законом продува и в сечении повторяет квадратный контур отверстия продува.

В начальные моменты времени на общем фоне нулевых по значению скоростей в центре расчетной области возникают зоны, в которых x -ые компоненты скорости отличны от нуля и противоположны по знаку. Стрелками на рисунках помечены направления движения частиц газа. В последующие моменты расчетного времени происходит заметное смещение областей с положительными и отрицательными значениями x -той компоненты скорости. Такое пространственное перераспределение означает, что вблизи геометрического центра расчетной области возникают встречные и разведенные в пространстве потоки газа, что равносильно возникновению вокруг вертикальной оси закрученного в положительном направлении движения частиц газа. Причем процесс сопровождается увеличением модулей скоростей и увеличением размеров этих областей, т. е. закрутка газа в положительном направлении усиливается.

Вторая компонента скорости имеет такие же особенности изменения от времени и поэтому описание здесь не приводится.

На слайде также представлены результаты трехмерных расчетов мгновенных линий тока частиц газа в области близкой к вертикальной части ВЗП. На рисунках видно, как постепенно происходит закрутка газа вблизи нижней плоскости расчетного параллелепипеда и процесс передачи вращательного движения сплошной среды в вертикальную часть ВЗП. Сформировавшаяся же вертикальная часть, которую видно на рисунках, представляет собой аналог (численную модель) хобота реального природного вихря.

Литература

1. **Баутин, С. П.** Торнадо и сила Кориолиса [Текст]. – Новосибирск : Наука, 2008. – 96 с.
 2. **Баутин, С. П.** Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков [Текст] / С. П. Баутин, И. Ю. Крутова, А. Г. Обухов. – Екатеринбург : УрГУПС, 2020. – 400 с.
 3. **Баутин, С. П.** Линеаризованная система уравнений газовой динамики при учете действия силы Кориолиса [Текст] / С. П. Баутин, И. Ю. Крутова. – Снежинск : СФТИ, 2019. – 60 с.
 4. **Баутин, С. П.** Скорость звука в многокомпонентной покоящейся среде [Текст] // Прикладная механика и техническая физика. – 2008. – Т. 49, №3. – С. 35–44.
-