

М.В.Шокуров, Н.Ю.Краевская

*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь***РАСПРОСТРАНЕНИЕ БРИЗОВОГО ТЕЧЕНИЯ В СДВИГОВОМ ПОТОКЕ**

Бризовое гравитационное течение является одной из составляющих бризовой циркуляции. При взаимодействии бризового гравитационного течения с синоптическим ветром изменяется как структура, так и динамика течения. Проведено численное моделирование распространения гравитационного течения навстречу синоптическому ветру со сдвигом с использованием негидростатической двумерной модели сжимаемой атмосферы. Показано, что сдвиг фонового ветра значительно влияет на структуру гравитационного течения, в частности, определяет его высоту и скорость.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *бризовая циркуляция, гравитационное течение, сдвиг ветра*

Введение. Одной из составляющих бризовой циркуляции является бризовое гравитационное течение. При своём развитии оно проходит через несколько стадий. Наибольший интерес представляет стадия с постоянной скоростью фронта, что объясняется её универсальностью для гравитационных течений различного масштаба. Для исследования гравитационных течений используются аналитические теории, натурные и лабораторные эксперименты, численное моделирование. Последний метод обычно применяется для изучения атмосферных гравитационных течений.

На начальном этапе развития теории гравитационных течений одной из ключевых работ была работа [1]. В ней рассматривалось гравитационное течение в ограниченном по высоте канале без учета сдвига. На основе законов сохранения массы, энергии, импульса была получена связь скорости фронта течения с его высотой.

В атмосфере синоптический ветер с вертикальным сдвигом значительно влияет на структуру и динамику атмосферных гравитационных течений. Существуют два теоретических подхода к анализу взаимодействия гравитационного течения со сдвиговым ветром, используя: (1) уравнение завихренности и (2) интегральные законы сохранения массы, энергии, импульса.

В работе [2] взаимодействие холодного воздуха, формирующегося в грозном облаке, и вертикального сдвига ветра в нижнем слое атмосферы рассматривалось как один из механизмов поддержания грозовой линии шквалов. В качестве теоретического метода использовалось уравнение завихренности.

В работе [3] построена аналитическая теория взаимодействия гравитационного течения со сдвиговым ветром, с использованием второго теоретического подхода. Показано, что сдвиг определяет высоту и скорость фронта гравитационного течения. Выполненное в [4, 6, 7] численное моделирование подтвердило теорию [3]. Также в этих работах количественно оценено влияние диссипации на распространение гравитационного течения

Цель данной работы – исследовать влияния скорости и направления сдви-

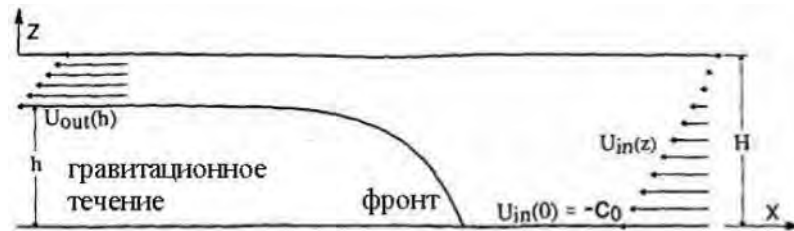


Рис. 1. Схематическое представление стационарного гравитационного течения, распространяющегося в потоке со сдвигом [3].

га ветра на характеристики гравитационного течения, для этого провести моделирование распространение гравитационного течения в потоке с однородным вертикальным сдвигом.

Постановка задачи. На рис.1 представлено гравитационное течение высоты h , распространяющееся в канале высотой H навстречу ветру с вертикальным сдвигом $U_{in}(z)$. Удобно рассматривать систему отсчёта, в которой течение стационарно. Фоновый ветер меняется линейно с высотой $U_{in}(z) = -c_0 + \alpha z$, где c_0 – скорость ветра на поверхности, а переменная α характеризует величину сдвига. Потенциальная температура гравитационного течения меньше потенциальной температуры окружения на величину $\Delta\theta$.

Все приведенные величины представлены в безразмерном виде, для обезразмеривания использовались следующие характерные величины: масштаб высоты $H = 1$ км, масштаб приведённой плавучести $g' = g\Delta\theta/\theta = 0,1$, масштаб скорости $U = (Hg')^{1/2} = 10$ м/с, масштаб времени $T = H/U = 100$ с.

Описание модели. Для исследования использовалась негидростатическая двумерная модель сжимаемой атмосферы без учёта вращения Земли [8]. Система уравнений состоит из четырех прогностических уравнений: уравнений движения для полных компонент скорости (u , w), уравнения для возмущения безразмерного давления (π) и уравнения переноса тепла для возмущения потенциальной температуры (θ). Для параметризации турбулентного переноса импульса и тепла использовались постоянные коэффициенты турбулентных вязкости и теплопроводности ($k_x = 10$ м²/с, $k_z = 3$ м²/с). Для конечно-разностного представления системы уравнений использовалась С-сетка Аракавы.

Численный эксперимент. Расчетная область занимает $L_x = 60$ км по горизонтали и $H = 1$ км по вертикали. Шаги сетки по горизонтали и вертикали равнялись $\Delta x = 50$ м, $\Delta z = 20$ м. Шаг по времени равнялся $\Delta t = 0,02$ с. Моделирование проводилось на 1,5 часа. В качестве основного состояния рассматривалась изоэнтропическая атмосфера (потенциальная температура в области была постоянной и равнялась 300 К), находящаяся в гидростатическом равновесии. Поля давления и плотности в основном состоянии были однородными по горизонтали.

В начальный момент времени гравитационное течение представлялось в форме холодной области $\Delta\theta = -3^\circ$, внутри которой движение отсутствует, а её верхняя граница задавалась параболической функцией, так чтобы наклон фронта на поверхности был равен 60° , согласно аналитической теории [1, 3]. Для определения поля скорости вне гравитационного течения реша-

лось уравнение Пуассона для функции тока, для определения распределения давления решалось уравнение Пуассона для давления.

Результаты. Распространение гравитационного течения моделировалось для трёх значений сдвига фонового ветра (табл.).

После непродолжительного этапа приспособления гравитационное течение достигало практически стационарного режима. Внутри гравитационного течения фактически нет движения. Перед фронтом течения наблюдался сильный подъём. На рис.2 представлено распределение горизонтальной u и вертикальной w компонент скорости в вертикальной плоскости.

Основной задачей данной работы является проверка аналитической теории, представленной в [3], для описания гравитационных течений в сжимаемой атмосфере.

Согласно аналитической теории, основными характеристиками гравитационного течения, зависящими от сдвига, являются его высота h и скорость c_0 . Расчёт высоты h течения проводился с использованием интегральной плавучести следующим образом:

$$h(x, t) = \frac{1}{g'_0} \int_0^H g \left(\frac{\theta_0 - \theta}{\theta_0} \right) dz,$$

где $g'_0 = \frac{g\Delta\theta}{\theta_0}$ – начальный дефицит плавучести.

Так как рассчитанные величины зависят от x и t , проводилось осреднение высоты по горизонтали (3 км от фронта) и по времени (15 минут).

В таблице приведены результаты расчётов h и c_0 для трёх значений сдвига фонового ветра $\alpha = -0,84; 0; 0,88$. Все величины в таблице приведены в безразмерном виде, значения сдвига безразмерены с помощью характерного масштаба времени $T = 100$ с. В первой строке таблицы приведены

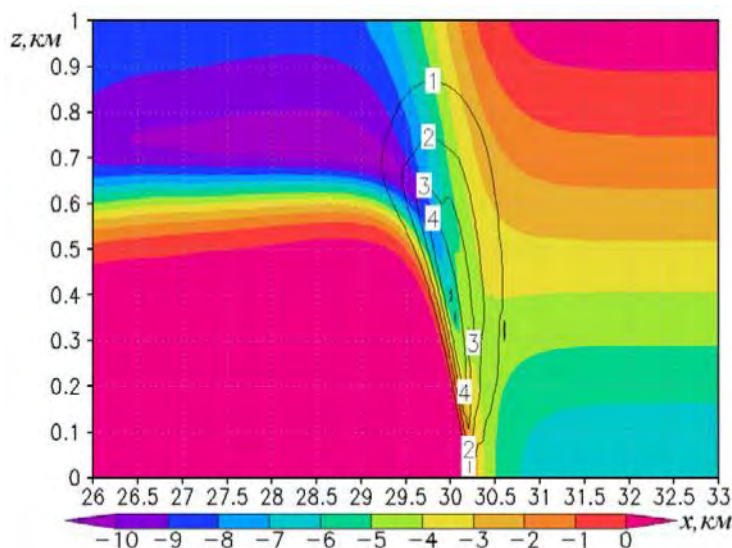


Рис. 2. Вертикальное сечение горизонтальной компоненты скорости ветра (показано цветом) и вертикальной компоненты (показано линиями) при $t = 50$ мин.

Т а б л и ц а . Значения высоты и скорости гравитационного течения при различных значениях сдвига ветра.

α источник	-0,84		0		0,88	
	h	c_0	h	c_0	h	c_0
[3]	0,300	0,326	0,500	0,500	0,700	0,755
[4]	0,214	0,318	0,405	0,486	0,667	0,772
[6]	0,187	0,297	0,356	0,478	0,635	0,746
данная работа	0,229	0,218	0,418	0,461	0,598	0,777

значения, полученные из аналитической теории [3], во второй и третьей строках представлены результаты численного моделирования из работ [4, 6]. В четвёртой строке – значения, полученные в данной работе.

В данной работе получились значения h и c_0 слегка меньше, чем в теории, и близкие к другим численным расчётам.

Хотя для исследования использовалась модель сжимаемой атмосферы, рассматриваемое течение занимало высоту намного меньше вертикального масштаба атмосферы (8 км), что даёт возможность для анализа полученных результатов использовать предположения справедливые для жидкости в приближении Буссинеска. На основе законов сохранения массы, потока импульса, энергии Бернулли вдоль линий тока и гидростатического соотношения можно объяснить зависимость скорости и высоты течения от сдвига в окружении [3].

Заключение. С помощью двумерной модели для сжимаемой атмосферы было проведено численное моделирование распространения бризового гравитационного течения в потоке со сдвигом в ограниченном канале. В результате были получены значения высоты и скорости течения при различных значениях сдвига синоптического ветра. Полученные значения были сравнены с результатами двумерной аналитической теории и результатами численного моделирования, выполненного ранее. Значения высоты и скорости получились меньше, чем предсказывает аналитическая теория, что уже было отмечено в существующих работах. Эти отличия могут быть обусловлены как влиянием перемешивания на границе между двух жидкостей, так и зависимостью результатов от выбора численной схемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Benjamin T.B. Gravity currents and related phenomena // J. Fluid Mech.– 1968.– v.31, issue 02.– P.209-248.
2. Rotunno R., Klemp J.B., Weisman M.L. A theory for strong, long-lived squall lines // J. Atmos. Sci.– 1988.– v.45, № 3.– P.463-485.
3. Xu Q. Density currents in shear flows—a two-fluid model // J. Atmos. Sci.– 1992.– v.49, № 6.– P.511-524.
4. Xu Q., Xue M., Droegemeier K.K. Numerical simulations of density currents in sheared environments within a vertically confined channel // J. Atmos. Sci.– 1996.– v.53, № 5.– P.770-786.
5. Xue M. Density currents in shear flows: Effects of rigid lid and cold-pool internal circulation, and application to squall line dynamics // Quart. J. Roy. Meteor. Soc.– 2002.– v.128.– P.47-73.

6. *Bryan G.H., Rotunno R.* Gravity currents in confined channels with environmental shear // *J. Atmos. Sci.*– 2014.– v.71, issue 3.– P.1121-1142.
7. *Nasr-Azadani M.M., Meiburg E.* Gravity currents propagating into shear // *J. Fluid Mech.*– 2015.– v.778.– P.552-585.
8. *Dailey P.S., Fovell R.G.* Numerical simulation of the interaction between the sea-breeze front and horizontal convective rolls. Part 1: Offshore ambient flow // *J. Mon. Wea. Rev.*– 1999.– v.127, issue 5.– P.858-878.

Материал поступил в редакцию 14.02.2016 г.

M.V.Shokurov, N.U. Kraevskaya

SPREADING OF THE SEA-BREEZE CURRENT IN SHEAR FLOW

The gravity current is one of the components of sea-breeze circulation. The current structure and dynamics are changed during interaction of sea-breeze gravity current with synoptic wind. The numerical simulation of gravity current spreading towards the synoptic wind with shear is held using the non-hydrostatic two-dimensional model of compressible atmosphere. It is shown that the background wind shear significantly affect the gravity current structure, in particular determines its height and speed.

KEYWORDS: breeze circulation, gravity current, wind shear