

8. Thomas A. S. W. The control of boundary-layer transition using a wave-superposition principle // *J. Fluid Mech.*— 1983.— V. 137.
9. Козлов В. В., Левченко В. Я., Сарик В. С. Образование трехмерных структур при переходе к турбулентности в пограничном слое // *Изв. АН СССР. МЖГ.*— 1984.— № 6.
10. Blackwelder R. F. Analogies between transitional and turbulent boundary layers // *Phys. Fluids.*— 1983.— V. 26, N 10.
11. Benney D. J., Lin C. C. On the secondary motion induced by oscillations in a shear flow // *Phys. Fluids.*— 1960.— V. 3, N 4.
12. Benney D. J. Finite amplitude effects in an unstable laminar boundary layer // *Phys. Fluids.*— 1964.— V. 7, N 3.
13. Benney D. J., Bergeron R. F. A new class of nonlinear waves in parallel flows // *Stud. Appl. Math.*— 1969.— V. 48, N 3.
14. Реутов В. П. Нестационарный критический слой и нелинейная стадия неустойчивости в плоском течении Пуазейля // *ПМТФ.*— 1982.— № 4.
15. Реутов В. П. Нелинейные волны и стабилизация двумерной неустойчивости в пограничном слое // *ПМТФ.*— 1985.— № 4.
16. Craik A. D. Nonlinear resonant instability in boundary layers // *J. Fluid Mech.*— 1971.— V. 50, pt 2.
17. Володин А. Г., Зельман М. Б. Трехволновое резонансное взаимодействие возмущений в пограничном слое // *Изв. АН СССР. МЖГ.*— 1978.— № 5.
18. Качанов Ю. В., Левченко В. Я. Резонансное взаимодействие возмущений при переходе к турбулентности в пограничном слое // *Препринт № 10-82.*— Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1982.
19. Гольдштик М. А., Лифшиц А. М., Штери В. Н. Число Рейнольдса перехода в плоском канале // *ДАН СССР.*— 1983.— Т. 273, № 1.
20. Leonard A. Vortex simulation of three-dimensional spotlike disturbances in a laminar boundary layer // *Turbulent shear flows.*— Berlin: Springer, 1980.— V. 2.
21. Бэтчелор Дж. Введение в механику жидкости.— М.: Мир, 1973.

Поступила 16/VI 1986 г.

УДК 532.527 + 551.515.3

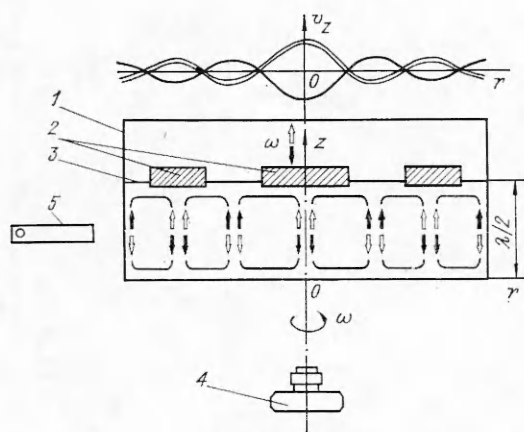
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СМЕРЧА

В. Г. Макаренко, В. Ф. Тарасов

(Новосибирск)

В работе представлены результаты экспериментального исследования движения жидкости, заполняющей вращающийся с постоянной угловой скоростью цилиндрический сосуд, часть внутренней поверхности которого колеблется заданным образом. Установлено, что при определенных условиях в жидкости образуется система вихрей. Основные свойства этих вихрей — колебательный характер движения жидкости в них и высокий уровень завихренности, значительно превышающий удвоенную угловую скорость вращения сосуда. При постановке экспериментов существенным образом были использованы данные [1, 2], где в линейном приближении приведены сведения о собственных колебаниях твердотельно вращающегося цилиндрического столба жидкости. Обнаружено, что свойства лабораторных вихрей аналогичны известным свойствам природных атмосферных вихрей — смерчей. Установленная аналогия позволяет дать объяснение многочисленным фактам, обусловленным прохождением смерча.

1. Опыты проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1. Прозрачный вертикальный цилиндрический сосуд *I*, в котором находилась жидкость, вращался с постоянной угловой скоростью ω . Движение первоначально твердотельно вращавшейся жидкости возмущалось посредством генератора *2*, состоявшего из диска, либо кольца, либо из диска и кольца. Поверхность жидкости *3* между дисками, кольцами и боковой поверхностью сосуда свободная. Диски и кольца вращались вместе с сосудом и в окрестности свободной поверхности жидкости совершали гармонические вертикальные колебания с частотой $\omega_r = \omega$. Данным способом в жидкости возбуждались осесимметричные инерционные волны (нулевая гармоника по азимутальной координате). Использовался резонансный режим возбуждения волн, который позволял выделить нужную моду и давал возможность получить волны большой амплитуды. Для обеспечения резонанса уровень жидкости в сосуде выбирался так, чтобы при заданной частоте колебаний генератора высота столба жидкости равнялась целому числу *N* полуволн исследуемой моды. Края дисков и колец генератора двигались по цилиндрическим поверх-



Р и с. 1

генератора приведены в таблице. В качестве жидкости использовались водные растворы поваренной соли и глицерина. Число Рейнольдса $Re = \omega R^2/\nu$ (ν — кинематическая вязкость жидкости) менялось от 10^3 до $6 \cdot 10^4$.

Для изучения внутренней структуры течение визуализировалось с помощью краски и полимерных шариков диаметром 0,5—1 мм с плотностью $\rho = 1,05$ г/см³. Картины течения фиксировались на фотопленку. Съемка в направлении оси вращения проводилась фотоаппаратом 4 (см. рис. 1), закрепленным на вращающемся сосуде. При этом поле течения освещалось плоским световым лучом 5, перпендикулярным оси вращения.

Следует отметить, что для возбуждения периодических по вертикальной координате осесимметричных инерционных волн значение ω_T , согласно [1], могло быть выбрано любым из диапазона $0 < \omega_T < 2\omega$.

2. При указанных условиях эксперимента через несколько периодов $T = 2\pi/\omega$ после включения генератора в жидкости создается течение, в котором нужная мода (основная волна) доминирует. На начальной стадии своего развития она имеет структуру, хорошо согласующуюся с предсказаниями линейной теории. При этом в плоскости прямоугольника $0 \leq r \leq R$, $0 \leq z \leq \lambda/2$ течение представляет собой набор колебательных ячеек с замкнутыми линиями тока, число которых совпадает с номером возбуждаемой моды (см. рис. 1, на котором приведена схема течения для третьей осесимметричной моды при $N = 1$; темными и светлыми стрелками показано направление течения жидкости при движении генератора соответственно вниз и вверх). Картины течения начального этапа при наблюдении сбоку совпадают с приведенными в [3]. С течением времени амплитуда основной волны нарастает и на ее фоне возникают азимутальные волны более высоких гармоник. При последующем нарастании и обрушении этих волн в жидкости образуется система вихрей, которые имеют достаточно сложную пространственно-временную структуру и обладают следующими основными свойствами:

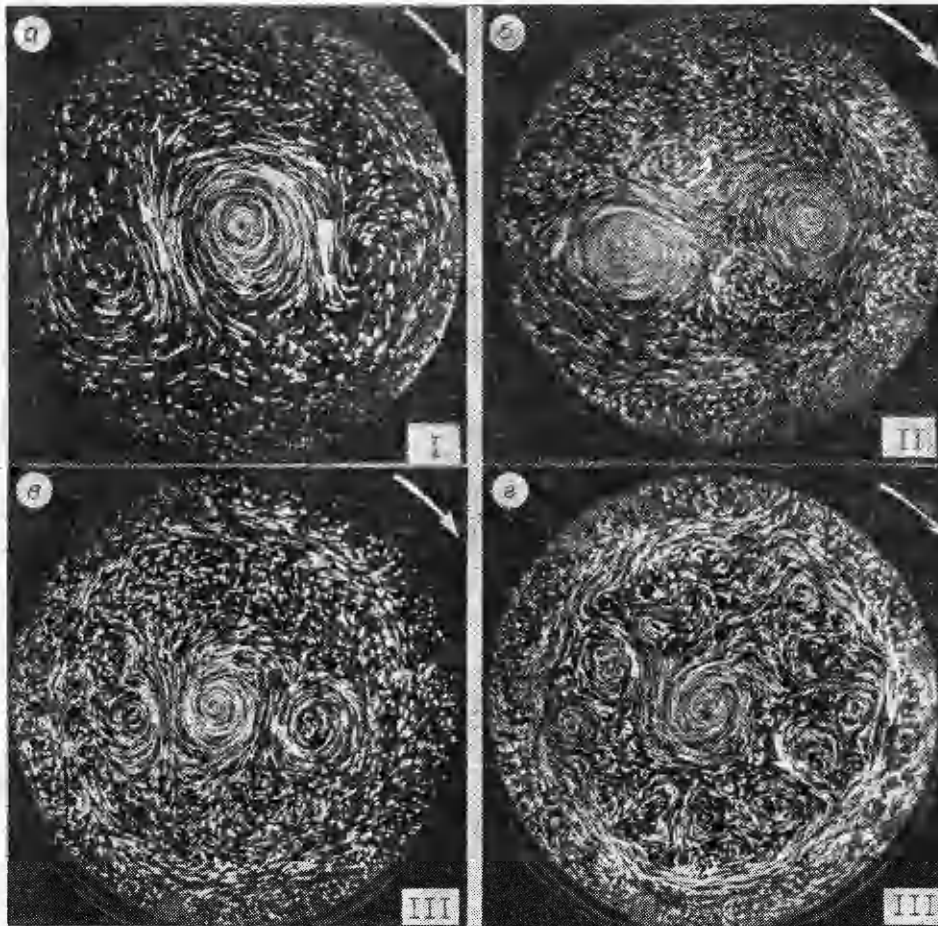
1) вихри формируются в областях максимумов абсолютной величины вертикальной скорости v_z , образуя кольцевые пояса вихрей;

2) вихри распространяются на всю глубину жидкости и параллельны оси вращения сосуда; 3) осевая скорость течения в вихре и интенсивность вихря в фиксированной относительно него точке испытывают колебания с частотой, в основном равной частоте колебаний генератора; на каждом полупериоде колебаний осевая скорость меняет знак;

| Мода | Диаметр диска, см | Внутренний и внешний диаметры кольца, см |
|------|-------------------|--|
| I | 1,55 | |
| II | — | 6,3; 14,5 |
| III | 4,36 | 10; 15,65 |

постоям, где вертикальная скорость v_z в возбуждаемой волне, рассчитанная по линейной теории [1], обращалась в нуль (см. рис. 1).

В опытах возбуждались первые три осесимметричные моды соответственно с длинами волн $\lambda = 26,2; 14,4; 9,9$ см при диаметре сосуда $2R = 18,4$ см. Угловая скорость вращения ω сосуда выбиралась из диапазона $2-6$ с⁻¹; заданное значение ω поддерживалось с точностью до 0,5%. Амплитуда a колебаний генератора равнялась 0,125; 0,25; 0,5; 1 см; $N = 1, 2, 3, 4$. Размеры дисков и колец



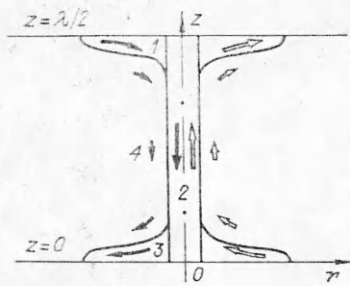
Р и с. 2

4) в среднем за период и по всей длине вихря угловая скорость вращения Ω в вихре относительно его оси в системе координат, связанной с сосудом, может быть положительной (циклонические вихри) и отрицательной (антициклонические вихри); кольцевые пояса с циклоническими и антициклоническими вихрями, как правило, чередуются;

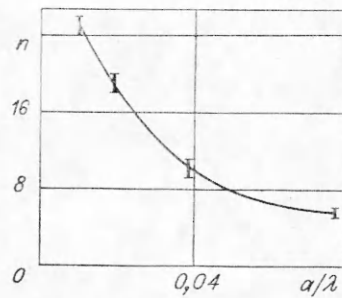
5) оба типа вихрей в окрестности уровней $z = 0, \lambda/2, \lambda, \dots$ могут иметь участки с относительной угловой скоростью противоположного знака.

На рис. 2 приведены снимки поперечного сечения потока на уровне $z = \lambda/4$. На них представлены системы вихрей, полученные при возбуждении первых трех осесимметричных мод соответственно для $a = 0,5; 0,25; 0,25; 0,5$ см (номер моды указан на фотографиях). В этих опытах плотность жидкости подбиралась равной плотности частиц, время экспозиции 0,5 с, $\omega = 4 \text{ с}^{-1}$, $Re = 4 \cdot 10^4$, $N = 1$. Направления вращения сосуда и движения жидкости в антициклонических вихрях отмечены стрелками.

Вихри движутся вместе с жидкостью с угловой скоростью, незначительно отличающейся от ω . Число вихрей растет с ростом номера моды. Образование более отдаленных от центра поясов вихрей при малой амплитуде колебаний генератора может не происходить. Количество вихревых кольцевых поясов и число вихрей в отдельном поясе растут с ростом амплитуды колебаний генератора, что иллюстрируют рис. 2, в, г. Максимальное число наблюдаемых поясов вихрей на 1 превышает число кольцевых колебательных ячеек.



Р и с. 3



Р и с. 4

В отдельных опытах внутри циклонического вихря, расположенного по оси сосуда, наблюдалась система из нескольких более мелких интенсивных вихрей, внутри которых жидкость также имеет колебательный характер движений.

Для более наглядного представления о структуре циклонического вихря приведем схему течения в приосевой области, возникающего при возбуждении первой осесимметричной моды, для $N = 1$ (рис. 3). В этом течении можно выделить четыре характерные зоны: 1, 3 — кольцевые области большой радиальной скорости, 2 — область большой осевой скорости и высокой относительной угловой скорости вращения, 4 — область умеренных радиальной и осевой скоростей.

При движении генератора сверху вниз жидкость из области 1 втекает в область 2, а из 2 — в 3. При этом из-за сохранения циркуляции скорость вращения жидкости, вытекающей из области 1 в 2, возрастает и к моменту остановки генератора на оси вихря на уровне $z = \lambda/2$ достигается максимальная относительная угловая скорость вращения. По этой же причине при вытекании жидкости из 2 в 3 скорость ее вращения уменьшается и на уровне $z = 0$ в момент остановки генератора в некоторой кольцевой области достигается минимальная относительная угловая скорость вращения. При обратном ходе генератора картина течения изменяется со временем в обратном направлении. На любой фазе колебаний в большей части области 2 (за исключением окрестностей уровней $z = 0, \lambda/2$) направление вращения жидкости остается циклоническим.

Для $N = 2$ схема течения может быть получена добавлением к рис. 3 его зеркального отображения относительно плоскости $z = 0$. Схемы течения для больших N конструируются аналогичным образом.

Приведем некоторые количественные характеристики циклонического вихря, образующегося при возбуждении первой осесимметричной моды. Для оценки его радиуса и угловой скорости вращения использовались зафиксированные на снимках при $N = 2$ треки частиц. С их помощью установлено, что средний радиус вихря $r_0 \approx R/20$. Максимальная относительная угловая скорость вращения $\Omega \approx 50\omega$ в вихре зафиксирована на уровне $z = \lambda/2$. На этом же уровне через полупериод колебаний (π/ω) достигалась минимальная $\Omega \approx -0,1\omega$. На уровне $z = \lambda/4$ в оба момента времени $\Omega \approx 20\omega$. Максимальная окружная скорость в вихре, соответствующая $\Omega \approx 50\omega$, в 2,5 раза превышала ωR . За один полупериод колебаний частицы в вертикальном направлении проходили расстояние, равное длине полуволны, что для осевой скорости жидкой частицы дает оценку $\langle \max |v_z| \rangle = \lambda/T$ ($T = 2\pi/\omega$).

Число периодов n колебаний генератора, за которое течение выходит на установившийся режим, зависит от амплитуды его колебаний. Эта зависимость, показывающая уменьшение n с ростом a , приведена на рис. 4 ($Re = 4 \cdot 10^4$, $N = 1$). С ростом ν время выхода течения на установившийся режим увеличивается (например, при $Re = 10^3$, $N = 1$, $a/\lambda = 0,076$, $n = 50$). При этом качественная картина течения не меняется, уменьшается лишь интенсивность вихря.



Р и с. 5

Наблюдавшиеся в экспериментах антициклонические вихри не обладали высокой интенсивностью. Зафиксированная в них $\Omega \approx -0,5\omega$ ($z = \lambda/4$).

3. Обнаруженные в экспериментах интенсивные вихри могут служить экспериментальной моделью природных атмосферных вихрей — смерчей, поскольку свойства рассматриваемых лабораторных вихрей аналогичны известным свойствам смерчей.

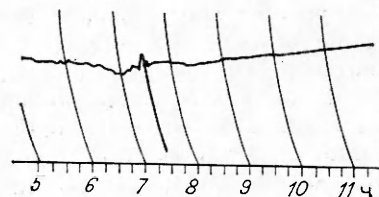
1. Известно [4], что смерчи формируются в мезоциклоне — атмосферном вихре с вертикальной осью, который, в сущности, есть природный аналог вращающегося столба жидкости в эксперименте. Нередки случаи, когда один мезоциклон порождает одновременно несколько смерчей [4] (рис. 5, а). На рис. 5, б показано семейство из четырех вихрей, полученное при возбуждении третьей осесимметричной моды. Вихри видны за счет плавучих частиц, первоначально находившихся у свободной поверхности жидкости.

2. Для смерча характерны значительные колебания его интенсивности у поверхности земли. Об этом свидетельствует «пунктирная» полоса разрушений — вдоль траектории движения смерча кроме участков активных разрушений имеются участки, где разрушения вообще отсутствуют [5]. На ранней стадии развития смерча нередко хорошо заметны вертикальные колебания его воронки [5]. Эти факты указывают на колебательный характер движений воздуха в смерче. Именно такой характер движений присущ лабораторному вихрю. Как и в природе, он проявляется, в частности, в сильных колебаниях интенсивности вращения на уровнях $z = 0$ (дно сосуда) и $\lambda/2$, где в зависимости от фазы $\Omega \approx 50\omega$ и $-0,1\omega$.

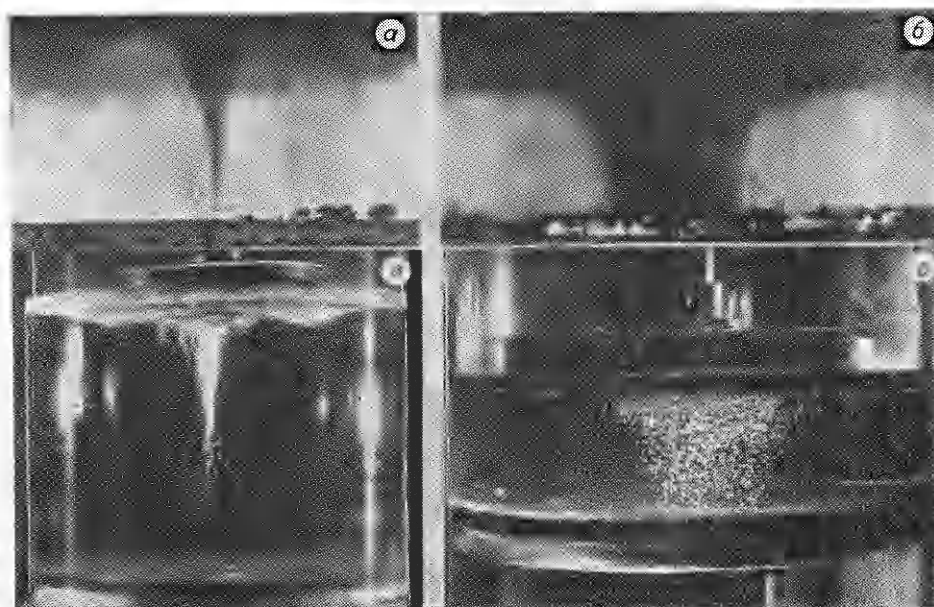
3. Зафиксированный при прохождении смерча профиль давления (рис. 6) показывает, что вблизи смерча имеются локальные максимумы давления [5]. Это свидетельствует о наличии около смерча областей с отрицательной относительно мезоциклона завихренностью. Аналогичные области в эксперименте показаны на рис. 2, а, в: рядом с центральным циклоническим вихрем расположены два антициклонических.

4. Внутри смерча зарегистрированы более мелкие вихри большой интенсивности, которые оставляют циклоидальные следы сильных разрушений [6]. Как уже упоминалось, и в лабораторных опытах внутри центрального циклонического вихря наблюдалась система вторичных более мелких вихрей.

5. Воронки смерча имеют разнообразные формы. За время жизни смерча форма воронки может неоднократно меняться. Для ранних стадий развития смерча чаще всего характерна узкая длинная хоботообразная воронка, представленная на рис. 7, а [4]. По мере усиле-



Р и с. 6



Р и с. 7

ния смерча воронка расширяется и в отдельных случаях принимает вид толстой колонны (рис. 7, б [5]). На рис. 7, в показан лабораторный вихрь на стадии нарастающих колебаний. Видимый «хобот» состоит из плавучих частиц, собранных у свободной поверхности жидкости, и приблизительно отражает осевую струю вихря (область 2, рис. 3). По мере роста колебаний в вихре частицы из областей 1, 2, 3 выносятся в область 4 и поперечный размер видимого «хобота» увеличивается. В режиме установившихся колебаний вихрь имеет вид, показанный на рис. 7, г.

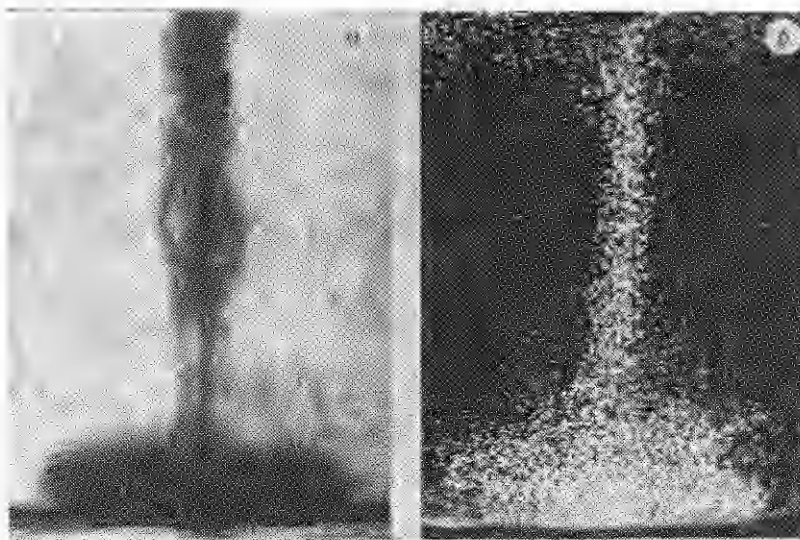
6. Одна из заметных черт смерча — каскад (облако, состоящее из пыли или водных капель). Каскады весьма различны по форме и являются частью видимой воронки смерча. Выделяют [5] необычные низкие каскады, горизонтальный размер которых значительно превышает диаметр воронки. Наблюдатели отмечают, что такой каскад образуется при ударе воронки о землю. Фотография низкого каскада приведена на рис. 8, а [5]. На рис. 8, б изображен каскад лабораторного вихря, полученный при ударе содержащей частицы осевой струи (рис. 7, в) о дно сосуда.

Опираясь на данные лабораторных экспериментов и используя средние параметры вращающегося атмосферного столба воздуха — мезоциклона (его высота и диаметр 5—10 км, максимальная окружная скорость ветра 15—25 м/с, угловая скорость вращения $3 \cdot 10^{-3}$ — 10^{-2} с⁻¹ [7]), сделаем оценку основных количественных характеристик смерчей.

1. Лабораторными экспериментами установлено, что период колебаний вихря (в том числе и период колебаний его интенсивности у дна сосуда) определяется периодом колебаний волны и грубо оценивается периодом вращения столба жидкости $T = 2\pi/\omega$. Такая оценка для периода колебаний интенсивности смерча у поверхности земли ($T = 2\pi/\omega$, $\omega = 3 \cdot 10^{-3}$ — 10^{-2} с⁻¹) дает 10—30 мин. При этом длина отрезков активных разрушений вдоль траектории смерча с учетом скорости его перемещения (чаще всего 15—20 м/с [5]) может достигать десятков километров, что соответствует данным наблюдений [5, 6].

2. Лабораторными экспериментами установлено, что отношение диаметра вращающегося столба жидкости к диаметру вихря приблизительно равно 20. Используя это соотношение и диаметр мезоциклона (5—10 км), получим характерное для диаметра смерча значение 250—500 м [5, 6].

3. По данным лабораторных экспериментов отношение максимальных окружных скоростей в вихре и вращающемся столбе жидкости рав-



Р и с. 8

но 2,5. Оценка максимальной окружной скорости ветра в смерче, основанная на этом соотношении и максимальной окружной скорости ветра в мезоциклоне (15—25 м/с), дает 40—60 м/с, а с учетом скорости перемещения смерча (15—20 м/с) — 55—80 м/с. Такие скорости характерны для большинства разрушительных смерчей [6]. С учетом наличия внутри основного смерча системы более мелких вихрей эти цифры могут быть существенно увеличены. Известно [6], что смерчи, имеющие многовихревую структуру, вызывают наиболее сильные разрушения.

Результаты лабораторных экспериментов позволяют объяснить различные, кажущиеся на первый взгляд поразительными и загадочными случаи, связанные с прохождением смерча. Образование утрамбованных дорожек из примятых кустарников, вбитых в землю различных предметов [5] может происходить на стадии колебаний смерча (или его вторичных вихрей), соответствующей нисходящему осевому потоку. Небольшая скорость ветра при прохождении смерча над головами наблюдателей [5] может быть обусловлена фазой колебаний, при которой скорость вращения в нем у поверхности земли близка к нулю. Разрушения при отсутствии видимой воронки [5] могут быть вызваны быстро развивающимся смерчем на стадии колебаний, соответствующей восходящему осевому потоку. Причиной аномально локальных повреждений, таких как полуоципаные куры [5], могут являться мелкие вторичные вихри в смерче, аналогичные интенсивным вторичным вихрям в лабораторном циклоническом вихре.

Установленное соответствие между лабораторными и природными вихрями указывает на то, что они имеют одинаковую природу и образование смерчей происходит при возмущении мезоциклона. Источниками таких возмущений могут служить, например, возникающие в сдвиговых течениях и при обтекании препятствий волновые движения в атмосфере [8] или неровности земной поверхности, с которыми взаимодействует движущийся мезоциклон.

Авторы выражают благодарность В. Л. Сенницкому за полезные обсуждения и ценные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kelvin Lord. Vibrations of a columnar vortex // *Phil. Mag.*— 1880.— V. 10.
2. Гринспен Х. Теория вращающихся жидкостей.— Л.: Гидрометеоиздат, 1975.
3. Fultz D. A note on overstability and the elastoid-inertia oscillations of Kelvin, Solberg and Bjerckness // *J. Meteorol.*— 1959.— V. 16, N 2.

4. Сноу Д. Торнадо // В мире науки. — 1984. — № 6.
5. Наливкин В. Д. Ураганы, бури и смерчи. — Л.: Наука, 1970.
6. Васильев А. А., Песков Б. Е., Снитковский А. Ш. Смерчи 9 июня 1984 г. — Л.: Гидрометеопздат, 1985.
7. Симпсон Дж. Вращение в кучевом облаке: модель и данные наблюдений в облачной системе, порождающей смерч // Интенсивные атмосферные вихри. — М.: Мир, 1985.
8. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. — Л.: Гидрометеопздат, 1976.

Поступила 26/VI 1986 г.

УДК 532.526 + 533.6.011

РАСЧЕТ ОТРЫВНОГО ОБТЕКАНИЯ СИСТЕМЫ КРЫЛО — ФЮЗЕЛЯЖ ДОЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ ГАЗА

А. В. Воеводин, Г. Г. Судаков

(Москва)

В [1, 2] рассмотрены задачи отрывного обтекания крыла малого удлинения, а также крыла конечного удлинения с наплывом дозвуковым потоком газа. На основе асимптотического анализа этих задач показано, что в обоих случаях правило Гетерта можно применять и в следующем (нелинейном по углу атаки) приближении. В данной работе эти результаты обобщены на случай отрывного обтекания комбинации крыло — фюзеляж и кратко изложены основные моменты асимптотического анализа исследуемых задач. Подробное описание математического аппарата дано в [1, 2]. Альтернативный подход, основанный на прямом решении уравнений Эйлера методом итераций без использования информации о малости параметров, развит в [3].

1. Постановка задачи. Рассмотрим стационарное отрывное обтекание комбинации крыла нулевой толщины с фюзеляжем потоком газа при $0 \leq M_\infty < 1$. Выберем систему единиц измерения таким образом, чтобы скорость набегающего потока и центральная хорда крыла были равны единице. Предполагается, что поверхности крыла и фюзеляжа симметричны относительно плоскости xy , скольжение отсутствует. Допустим, что в потоке имеются вихревые поверхности (вихревая пелена), сходящиеся с передних кромок крыла, но отрыв с фюзеляжа отсутствует.

Относительно геометрии компоновки сделаем следующие предположения. Пусть длина фюзеляжа $L = O(1)$, а его поперечный размер $\varepsilon = o(1)$. Рассмотрим отдельно случай крыла малого удлинения $\lambda = O(\varepsilon)$ (задача 1) и конечного удлинения $\lambda = O(1)$ с наплывом большой стреловидности (задача 2), так что удлинение наплыва $\lambda_{\text{н}} = O(\varepsilon)$. В обеих задачах предполагается, что $\alpha = O(\varepsilon)$.

Пусть φ — потенциал течения, a — скорость звука, u, v, w — составляющие скорости по осям x, y, z . Тогда потенциал течения удовлетворяет уравнению [4]

$$\left(1 - \frac{u^2}{a^2}\right) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \left(1 - \frac{v^2}{a^2}\right) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \left(1 - \frac{w^2}{a^2}\right) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} - 2 \frac{uv}{a^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} - 2 \frac{uw}{a^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial z} - 2 \frac{vw}{a^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y \partial z} = 0,$$

граничным условиям непротекания на фюзеляже, крыле и пелене, а также условию непрерывности давления при переходе через пелену и условию Чаплыгина — Жуковского на тех кромках, где предполагается наличие отрыва потока.

2. Асимптотический анализ. Перейдем к описанию результатов асимптотического анализа задачи 1 (комбинация фюзеляж — крыло малого удлинения). Полное изложение математического аппарата приведено в [1].

Введем зону 1 — область внешнего течения с характерными размерами $O(1)$, в ней при $\lambda \rightarrow 0$ и $\varepsilon = O(\lambda)$ система крыло — фюзеляж изображается отрезком оси x . Тогда в первом приближении в зоне 1 имеем просто равномерный поток. Это решение не описывает течение в окрестности крыла, поэтому необходимо рассмотреть внутреннюю зону 2 с про-