

УДК 532.526.10

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ СКОРОСТИ И ДАВЛЕНИЯ В ЗОНЕ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ КАВЕРНЫ, РАСПОЛОЖЕННОЙ НА СТЕНКЕ ПЛОСКОГО КАНАЛА. ЧАСТЬ II

Е. В. БРУЯЦКИЙ, А. Г. КОСТИН, Е. И. НИКИФОРОВИЧ

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев
03680 Киев – 180, МСП, ул. Желябова, 8/4
eugenen@kfh.se

Получено 04.02.2013

В статье анализируются результаты численного исследования полей давления и эффектов нестационарности при движении несжимаемой жидкости в зоне прямоугольной каверны, расположенной на нижней стенке плоского канала. Метод расчета параметров течения основан на прямом численном решении нестационарных уравнений Навье–Стокса в переменных скорость–давление. Показано, что при стационарном течении в плоском канале с прямоугольной каверной рост числа Рейнольдса приводит к нестационарности течения в зоне каверны. В работе подробно изучается распределение поля давления внутри каверны и в зоне ее расположения в зависимости от числа Рейнольдса для трех вариантов параметра длины каверны и двух форм профиля продольной скорости во входном сечении канала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: численное моделирование, плоский канал, прямоугольная каверна, поля давления, эффекты нестационарности, числа Струхала

В статті аналізуються результати чисельного дослідження полів тиску і ефектів нестационарності при руху нестигливої рідини в зоні прямокутної каверни, яка розташована на нижній стінці плоского каналу. Метод розрахунку параметрів течії заснований на прямому чисельному вирішенні нестационарних рівнянь Нав'є–Стокса у змінних швидкість–тиск. Показано, що при стаціонарній течії у плоскому каналі з прямокутною каверною ріст числа Рейнольдса призводить до нестационарності течії в зоні каверни. В роботі докладно вивчається розподілення поля тиску всередині каверни і у зоні її розташування в залежності від числа Рейнольдса для трьох варіантів параметру довжини каверни та двох форм профілю поздовжньої швидкості у вхідному перетині каналу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: чисельне моделювання, плоский канал, прямокутна каверна, поля тиску, ефекти нестационарності, числа Струхала

The paper analyzes numerical investigation results obtained for pressure fields and nonstationarity effects in case of incompressible fluid moving in the area of a rectangular cavity located on a bottom of a flat channel. A method of flow parameters calculation is based on the direct numerical solution of nonstationary Navier-Stokes equations in velocity-pressure variables. It is shown that under the conditions of a stationary flow in the channel with a rectangular cavity, the Reynolds number growth results in the flow nonstationarity in the cavity area. The work is focused on detailed studies of pressure distribution inside of the cavity and in its location area depending on the Reynolds number for three cases of a cavity length and two shapes of a streamwise velocity profile at the entry section of the channel.

KEY WORDS: numerical simulation, flat channel, rectangular cavity, pressure fields, nonstationary effects, Numbers of Struhal

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа является продолжением наших исследований по изучению особенностей течений в плоском канале, на нижней стенке которого расположена прямоугольная каверна. Постановка этой задачи и метод прямого численного решения нестационарных уравнений Навье–Стокса в переменных скорость–давление для несжимаемой жидкости применительно к расчету поля скоростей и тонкой вихревой структуры течения в канале с прямоугольной каверной опубликованы в нашей работе [1]. Однако, кроме поля скоростей и вихревой структуры течения в канале с геометрической неоднородностью типа каверны, большой интерес представляют также поля давления и эффекты нестационарности.

Так как используемый метод решения систе-

мы исходных нестационарных уравнений движения несжимаемой жидкости реализован в переменных скорость–давление, то это дает возможность рассчитывать не только поля скорости, но и поля давления. Результаты численных исследований, относящиеся к распределению поля давления, представлены в данной статье в виде зависимостей безразмерных коэффициентов давления

$$C_p = \frac{p - p_1}{\rho u_0^2 / 2}$$

от времени, числа Рейнольдса и геометрических параметров задачи. Здесь p – локальное значение давления; p_1 – характерное давление в невозмущенном потоке, то есть на геометрической оси во входном сечении канала.

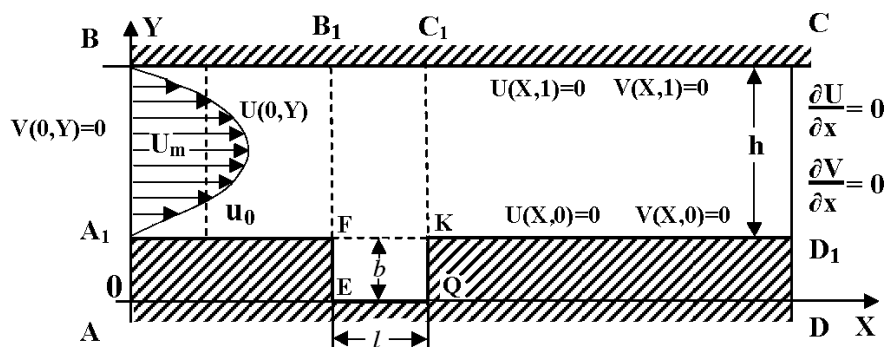


Рис. 1. Принципиальная схема рассматриваемого течения в плоском канале с прямоугольной каверной

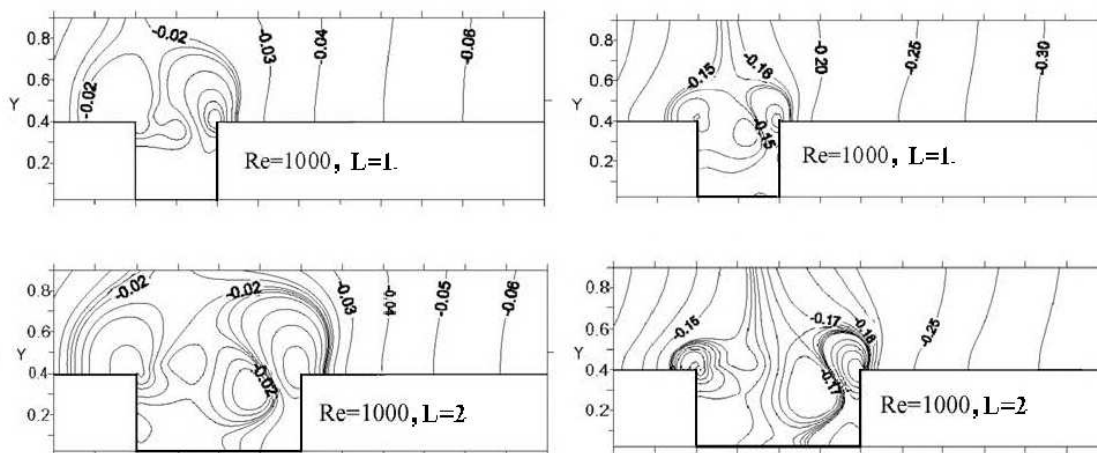


Рис. 2. Фрагменты расчетных изолиний коэффициентов давления C_p в каверне ($L = 1$ и $L = 2$; $B = 0.4$) с параболическим профилем скорости на входе в канал (левые фрагменты) и однородным (правые фрагменты) при числе Рейнольдса $Re = 1000$ для $\tau = 100$

1. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПОЛЯ ДАВЛЕНИЯ

Принципиальная схема рассматриваемого течения и параметры каверны b, l приведены на рис. 1. В результате проведенных расчетов были исследованы поля давления в зоне каверны с безразмерным параметром глубины $B = b/h = 0.4$ и тремя параметрами длины $L = l/b = 1, 2, 4$ при трех различных числах Рейнольдса.

В качестве примера полученных результатов на рис. 2 представлены расчетные значения коэффициента давления C_p в виде изолиний (изобар) для каверны с параметром длины $L = 1$ и $L = 2$, глубиной $B = 0.4$, при параболическом профиле скорости на входе в канал (левые фрагменты) и при однородном профиле (правые фрагменты) для числа Рейнольдса $Re = 1000$ при $\tau = 100$,

$\tau = tu_0/h$ – безразмерное конвективное время. Нетрудно видеть, что картина этих изолиний достаточно сложна, а ниже по потоку сразу за каверной давление в потоке быстро восстанавливается и становится постоянным в поперечных сечениях канала.

Расчеты также показывают, что с ростом числа Рейнольдса картина изолиний коэффициентов давления качественно изменяется. Чтобы оценить влияние числа Re и протяженности каверны на вихревую структуру течения были выполнены расчеты для случая $L = 4$.

На рис. 3 представлены расчетные значения изобар для каверны с параметром $L = 4$ и глубиной $B = 0.4$. При этом параболическому профилю скорости на входе в канал соответствуют три верхних фрагмента, а в случае однородного входного профиля скорости картина распределения давления

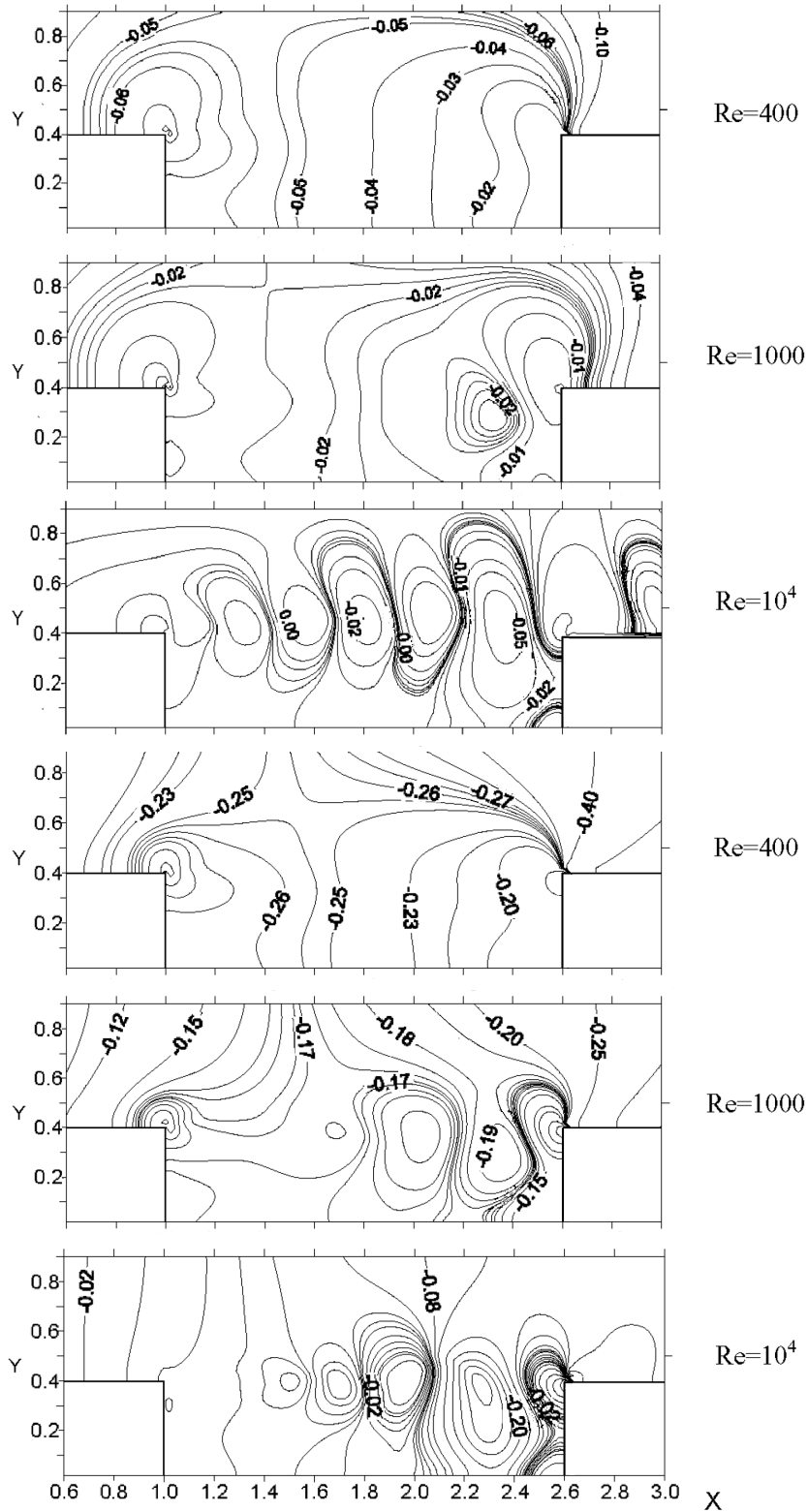


Рис. 3. Фрагменты расчетных изолиний коэффициентов давления C_p в прямоугольной камере ($L = 4$, $B=0.4$) с параболическим профилем скорости на входе в канал (три верхних фрагмента) и однородным (три нижних) при трех числах Рейнольдса для $\tau = 100$

показана на трех нижних фрагментах рис. 3.

Представленные фрагменты расчетных изолиний коэффициентов давления наглядно демонстрируют форму изобар в зоне каверны с $L = 4$, которая качественно отличается от случаев, когда $L = 1, 2$. В частности при параболическом входном профиле и числах $Re = 10000$ образуются периодические ячеистые структуры с зонами сжатия и разряжения внутри каверны.

Анализ результатов по распределению давлений показывает, что общая картина поля давлений в плоском канале с прямоугольной каверной при всех трех параметрах ее геометрии ($L = 1, 2, 4$) зависит не только от числа Рейнольдса, но и от формы профиля продольной скорости на входе в канал. В целом расчеты полей давлений показали, что в зоне каверны возникают области сжатия и разряжения, обусловленные взаимодействием вихревого движения внутри каверны с внешним потоком. При этом для длины каверны $L = 4$ эти области сжатия и разряжения смещаются внутрь каверны навстречу основному потоку.

Рассмотрим теперь результаты расчетов изменения коэффициента давления C_p на характерных горизонтальных участках течения в зоне расположения каверны. Для этого было изучено распределение давления на верхней стенке канала BC и на нижней стенке канала по линии A_1D_1 , совпадающей со свободной границей каверны. Кроме того, было рассмотрено также распределение давления на двух характерных вертикальных участках EFB_1 и QKC_1 , проходящих через левую и правую вертикальные стенки каверны (см. рис. 1).

В качестве примера на рис. 4 приведены результаты расчетов изменения коэффициента давления C_p вдоль оси X на нижней стенке канала A_1D_1 ($Y = 0.44$) при параболическом профиле скорости на входе в канал (слева) и однородном профиле (справа) для двух значений параметра длины каверны $L = 2, 4$ при четырех числах Рейнольдса (600, 1000, 2000, 10000) для $\tau = 100$. Нетрудно видеть, что при параболическом профиле коэффициент давления C_p на участке $0 \leq X \leq 1$ медленно падает, как и в прямолинейном канале без каверны. Однако ниже по потоку, вследствие наличия каверны, давление на участке FK несколько возрастает из-за расширения потока, а затем при числах Рейнольдса $Re \leq 1000$ снова убывает с удалением от каверны, а при числах $Re > 2000$ характер изменения давления становится иным. С ростом числа Рейнольдса давление вниз по потоку возрастает и при числах $Re \geq 10000$ имеет волновой характер. Анализ расчетов при другом, то есть однородном профиле продольной скорости на вхо-

де в канал, показал (справа), что такой характер изменения давления имеет место только при параболическом входном профиле скорости, и связано это с вихревой структурой потока в канале за каверной.

Обратимся теперь к рассмотрению распределения давления в двух характерных вертикальных сечениях EFB_1 и QKC_1 , проходящих через левую и правую вертикальные стенки каверны (см. рис. 1).

На рис. 5 (вверху) приведены результаты расчетов изменения коэффициента давления C_p вдоль оси Y в сечении $X = AE + EQ = 1 + 1.6 = 2.6$ вдоль правой вертикальной границы каверны QKC_1 при четырех числах Рейнольдса, указанных на рисунках, для $\tau = 100$.

На этом же рисунке внизу представлены аналогичные результаты расчетов изменения коэффициента давления C_p в вертикальном сечении QKC_1 , но уже при однородном входном профиле продольной скорости. Сравнительный анализ показывает, что коэффициенты давления зависят от формы входного профиля и от длины каверны L , а с ростом числа Рейнольдса они увеличиваются. Кроме того, отметим, что максимальные уровни давления наблюдаются в каверне с $L = 4$ вблизи кормовой вертикальной стенки, а на передней левой стенке они минимальны.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ЭФФЕКТОВ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ

Весьма интересным физическим явлением в исследуемой системе канал-каверна оказалось то, что стационарный поток в канале при наличии каверны на его стенке может вызывать самоподдерживающиеся осцилляции параметров потока в зоне каверны. Частота и амплитуда осцилляций давления и скоростей зависят от числа Рейнольдса и других геометрических параметров задачи. В данной работе подробно исследовалась каверна с параметром длины $L = 4$ и глубиной $B = 0.4$ при числе Рейнольдса $Re = 10000$, которое было выбрано, исходя из анализа вихревых структур внутри каверны.

Нестационарность режима течения в зоне каверны изучалась с помощью расчета мгновенных значений параметров потока в слое смешения основного потока в канале с жидкостью в каверне. При этом рассматривались два вида профиля продольной скорости на входе в канал.

Зависимость поведения вертикальной скорости V и коэффициента давления C_p от времени изуча-

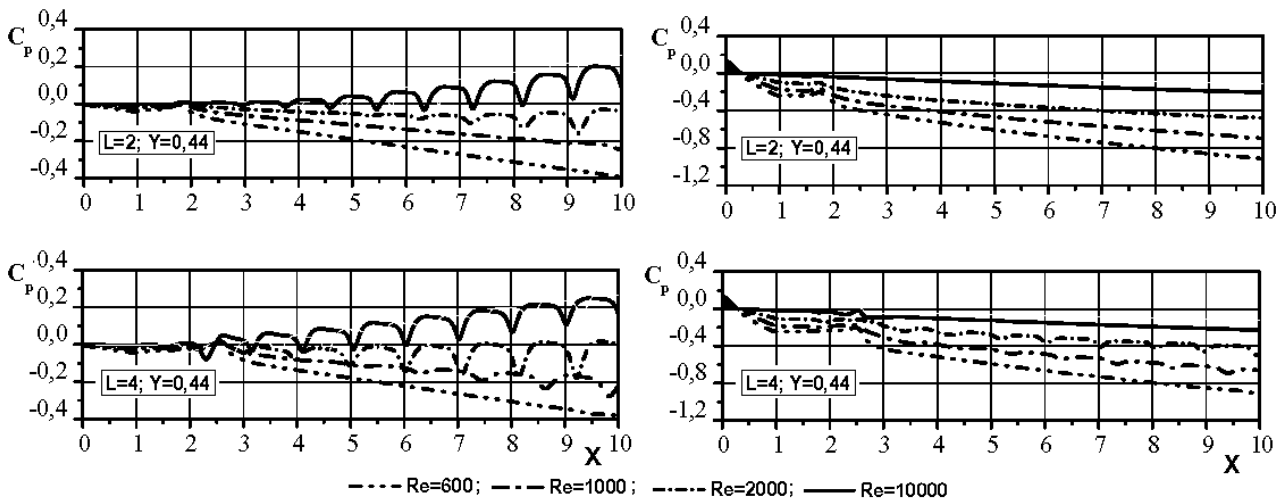


Рис. 4. Изменение коэффициента давления C_p вдоль оси X на высоте $Y=0.44$ при параболическом (слева) и при однородном (справа) профилях скорости на входе в канал для двух значений параметра $L=2, 4$ при четырех числах Рейнольдса для $\tau = 100$

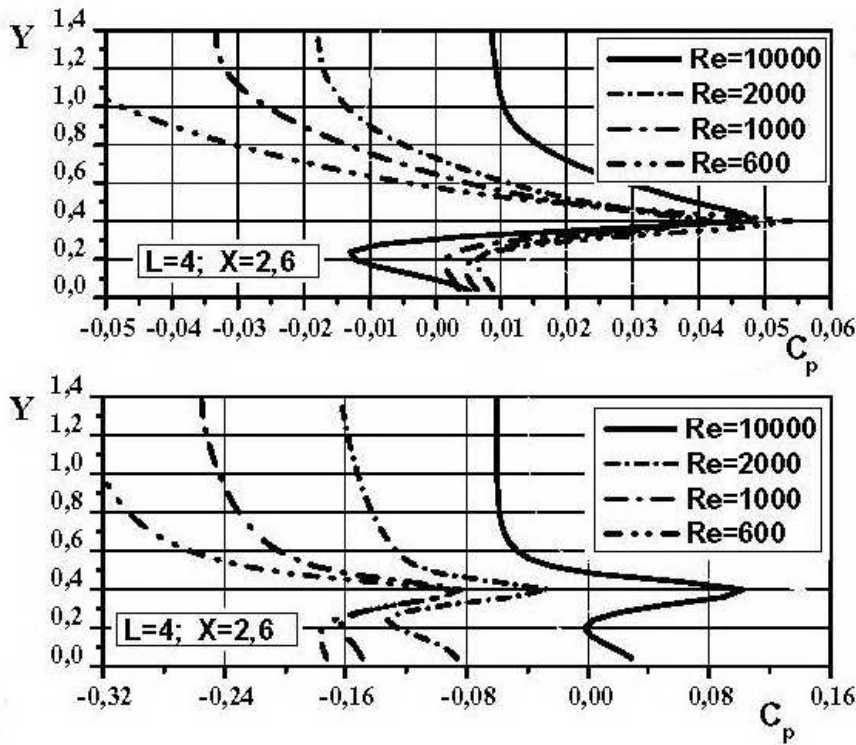


Рис. 5. Изменение коэффициента давления C_p вдоль оси Y в сечении $X = 2.6$ при параболическом (вверху) и однородном (внизу) профилях скорости на входе в канал для $L=4$ и $B=0.4$ при четырех числах Рейнольдса для $\tau = 100$

лась в 15 реперных точках рассматриваемого течения. Принципиальная схема расположения этих точек представлена на рис. 6.

Однако интересными для изучения оказались шесть точек с номерами 7, 8, 15, 10, 11, 12. Указанные точки находятся на одной горизонтали в

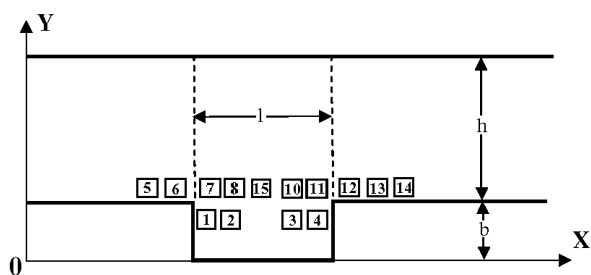


Рис. 6. Схема расположения 15 расчетных реперных точек

наружном слое над каверной с вертикальной координатой $Y = 0.43$. Точки 7, 8 вдоль оси X удалены от левой кромки каверны вниз по потоку на расстояние $0.1h$ и $0.2h$ соответственно, а точки 15, 10, 11 удалены от правой кромки каверны влево вверх по потоку на расстояние $0.3h$, $0.2h$, $0.1h$ соответственно. Точка 12 расположена за правым углом каверны вблизи стенки канала и удалена от угла каверны по течению на расстояние $0.1h$.

Результаты расчетов поведения вертикальной скорости V и коэффициента давления C_p в различных реперных точках в зависимости от времени при двух формах профиля продольной скорости при числе $Re = 10000$ приведены на рис. 7, 8 соответственно для времени $\tau = 100$. Легко видеть, что оба параметра V и C_p во всех рассматриваемых шести точках совершают периодические колебания как при параболическом, так и при однородном начальном профиле скорости, но они не идентичны в этих двух случаях.

На рис. 7 представлены результаты расчетов зависимости вертикальной скорости V от времени в шести характерных реперных точках (шесть верхних фрагментов) при параболическом профиле скорости на входе в канал. Анализ полученных результатов показывает, что на рассматриваемом уровне $Y = 0.43$ во всех шести точках наблюдаются регулярные осцилляции скорости вблизи нулевого уровня с основной частотой, соответствующей числу Струхалия $St = f \cdot h / u_0 = 0.195$, построенному по линейному масштабу h (высота канала). По нашим данным частота колебаний в каждой из шести точек в случае параболического профиля постоянна, а величина амплитуд разная. В точках 7, 8 они почти одинаковые и относительно малы, в точках 15, 10, 11 они максимальные и одинаковые. В точке 12, расположенной за правой кромкой каверны, значение амплитуды почти в два раза меньше максимальной, но значительно больше минимальной.

На том же рис. 7 представлены результаты ра-

счетов зависимости вертикальной скорости V от времени, но при однородном профиле скорости на входе в расчетную область для того же числа Рейнольдса $Re = 10000$. Анализ этих результатов показывает, что и в этом случае во всех шести рассматриваемых точках наблюдаются регулярные осцилляции, но основная частота в этом случае соответствует числу Струхалия $St = 0.182$. Наряду с отличием значения числа Струхалия от первого случая, имеются и другие отличия. Например, осцилляции вертикальной скорости в точках 7, 8 при однородном профиле совершаются возле ненулевого уровня. Кроме того, амплитуды колебания по времени в точках 15, 10 практически одинаковы. Другой отличительной чертой рассматриваемого случая однородного профиля скорости на входе является наличие в осцилляциях вторых гармоник.

На рис. 8 представлены результаты расчетов зависимости коэффициентов давления C_p от времени в тех же шести реперных точках 7, 8, 15, 10, 11, 12 при параболическом (шесть верхних фрагментов) и однородном (шесть нижних фрагментов) профилях продольной скорости на входе в канал для числа $Re = 10000$, $B = 0.4$ и $L = 4$. Анализ этих результатов показывает высокую корреляцию динамики коэффициентов давления C_p с динамикой поперечной скорости V . Во всех шести точках также наблюдаются регулярные осцилляции. Их форма хорошо видна на приведенных рисунках. Легко видеть, что формы колебаний C_p при однородном профиле значительно отличаются от формы кривых для случая параболического профиля скорости на входе в канал.

В целом анализ нестационарности показывает, что амплитуды колебания параметров потока V и C_p в различных точках слоя смешения отличаются друг от друга по величине в зависимости от формы профиля продольной скорости на входе. Наиболее высокие из них оказались при числе $Re = 10000$ в зоне задней кромки каверны при однородном входном профиле.

По результатам расчетов были найдены периоды колебаний для определения характерных частот колебания параметров потока в зоне каверны. Соответствующие числа Струхалия, построенные по частоте изменения коэффициентов давления C_p в левой, средней и правой стороне каверны на уровне $Y = 0.43$, различны. В случае параболического профиля продольной скорости в точках 7, 8 основная частота соответствует числу Струхалия $St = 0.154$, в точках 15, 10 – числу Струхалия $St = 0.180$, а в точках 11, 12 – числу Струхалия $St = 0.192$. В случае однородного входного профи-

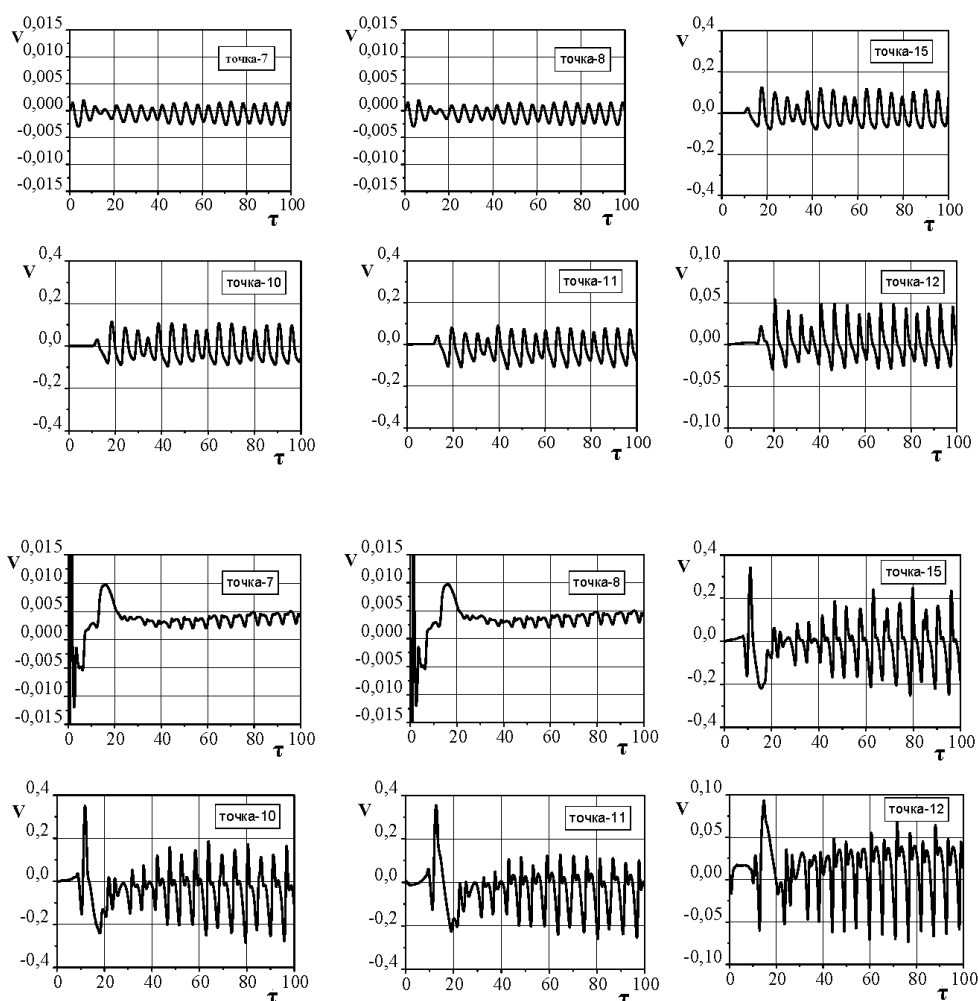


Рис. 7. Зависимость вертикальной скорости V от времени в шести реперных точках при параболическом профиле скорости (шесть верхних фрагментов) и однородном профиле скорости на входе в канал (шесть нижних фрагментов) для $Re = 10000$ ($L = 4$, $B = 0.4$)

для продольной скорости во всех точках – 7, 8, 15, 10, 11, 12 – основная частота колебания давления почти одинаковая и соответствует числу Струхала $St = 0.182$.

Таким образом, прямое численное моделирование на основе нестационарных уравнений движения вязкой жидкости в переменных скорость–давление показывает, что при определенных числах Рейнольдса наблюдаются осцилляции компонентов скорости и давления с доминирующими частотами, соответствующими числу Струхала $St \approx 0.180$, близкому к его значениям в следовой моде колебаний в сдвиговых слоях [2]. Наряду с механизмом неустойчивости в сдвиговой зоне значительное влияние на интенсивность пульсаций поперечной скорости и давления в кормовой части каверны оказывает воздействие набегающе-

го сдвигового слоя на заднюю стенку каверны.

Анализ поведения изолиний равных скоростей и амплитудно-частотные характеристики скорости и давления указывают на наличие периодических выбросов жидкости из каверны в основной поток. Такой автоколебательный режим для различных углублений и лунок на обтекаемых поверхностях отмечался в расчетных и экспериментальных исследованиях и других авторов [3–7].

Чтобы лучше понять физический механизм перестройки течения внутри каверны, приводящий к периодическим выбросам жидкости из каверны в основной поток в канале, рассмотрим конкретный пример результатов расчета фрагментов скоростей в изолиниях в различные моменты времени на одном периоде колебаний при числе Рейнольдса $Re = 10000$ для двух форм профиля продольной

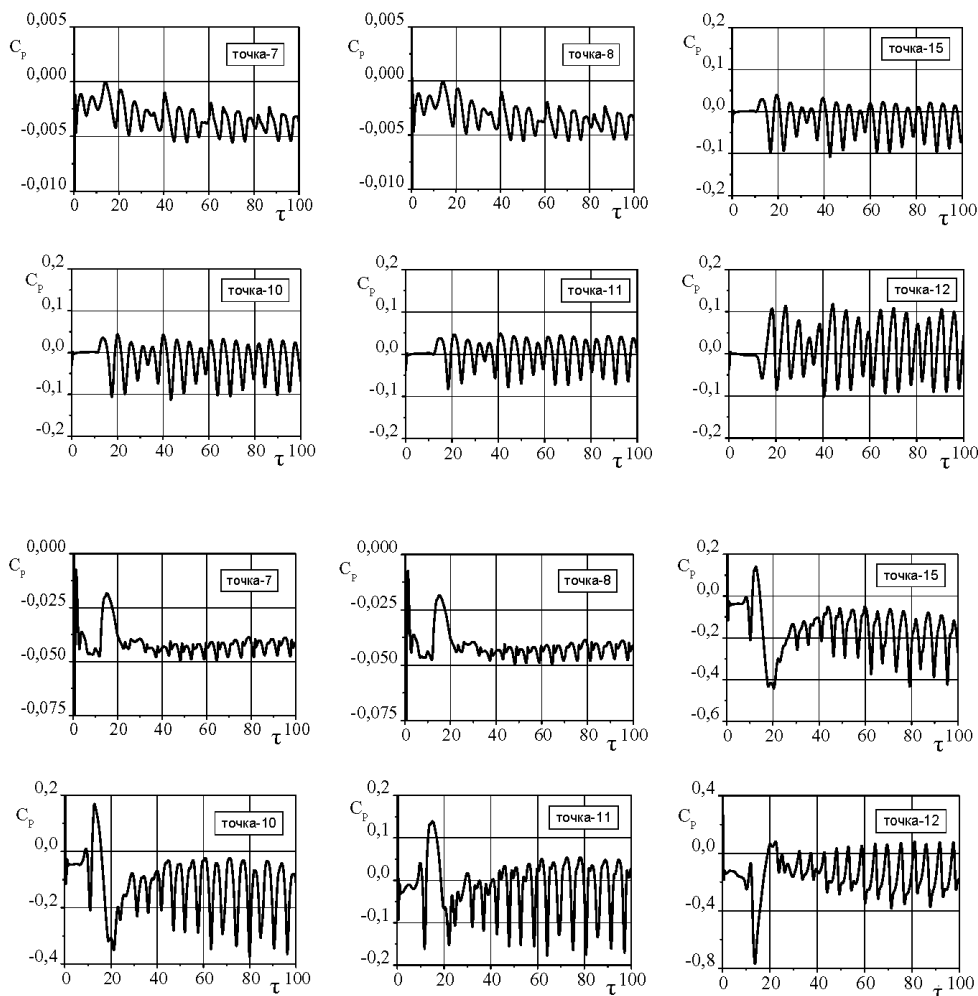


Рис. 8. Зависимость коэффициента давления C_p от времени в шести реперных точках при параболическом профиле скорости (шесть верхних фрагментов) и однородном профиле скорости на входе в канал (шесть нижних фрагментов) для $Re = 10000$ ($L = 4, B = 0.4$)

скорости $U(Y)$ перед каверной. Результаты таких расчетов показаны на рис. 9 в различные моменты времени $\tau = 60 - 64.8$ с интервалом $\Delta\tau = 1.2$. При этом на рис. 9 слева представлены результаты расчетов поля скоростей в изолиниях для случая параболического профиля скоростей на входе в канал, а справа – для однородного профиля. Эти рисунки наглядно иллюстрируют изменение структуры поля скоростей в течение одного периода колебания, обусловленного неустойчивостью в сдвиговом слое и его взаимодействием с жидкостью внутри каверны.

Сравнительный анализ этих двух рисунков демонстрирует различие вихревых структур течения в каверне на одном периоде колебания при параболическом и однородном профиле скорости на входе. В первом случае механизм неустойчивости в сдви-

говом слое слабо развит и незначительно влияет на взаимодействие и смещение внешнего потока с жидкостью в каверне.

Во втором случае, когда профиль скорости перед каверной не параболический, а более наполненный, течение внутри каверны, особенно в задней ее части, имеет ярко выраженный большой вихрь, занимающий почти во все моменты времени половину объема каверны и имеющий большие локальные скорости порядка 0.2 от основной скорости. Этот интенсивный вихрь взаимодействует с внешним потоком и задней стенкой каверны, вызывая крупномасштабные периодические выбросы жидкости во внешний поток. Приведенные на рис. 9 справа различные фазы взаимодействия этого вихря на одном периоде колебаний позволяют проследить динамику внутри каверны

ния. В результате в правой зоне каверны периодически происходит своеобразный выброс жидкости из каверны и давление в потоке здесь пульсирует.

Описанный механизм формирования нестационарности течения в зоне каверны подтверждается при внимательном визуальном анализе результатов расчета, приведенных в графическом виде. Данное объяснение механизма вихреобразования в каверне в литературе уже обсуждалось [6]. В работе К. Chang и др. [8] представлены их собственные экспериментальные и теоретические результаты, которые получены с использованием LES моделирования. Там отмечается ограниченная возможность LES моделей с точки зрения анализа мелко-масштабной структуры течения.

ВЫВОДЫ

Численно исследованы поля давления и эффекты нестационарности в плоском канале с прямоугольной каверной, расположенной на нижней его стенке. Для различных чисел Рейнольдса в шести реперных точках получены временные ряды мгновенных значений поперечной скорости и коэффициентов давления.

Показано, что стационарный поток в канале с прямоугольной каверной, имеющей параметры длины $L = 2$ и $L = 4$ с глубиной $B = 0.4$, в зависимости от числа Рейнольдса может вызывать самоподдерживающиеся осцилляции течения типа автоколебаний в зоне расположения каверны.

Анализ расчетных результатов показал, что амплитуда колебания параметров потока в различных реперных точках в сдвиговом слое каверны различна и зависит от формы профиля продольной скорости перед каверной. Наиболее высокие из них находятся в зоне задней кромки каверны при однородном профиле продольной скорости на входе в канал.

Обнаружено, что при однородном профиле скорости на входе в канал для каверны с параметром длины $L = 4$ и числе Рейнольдса $Re = 10000$ существует экстремальный режим взаимодействия основного потока в канале с жидкостью в каверне, при котором наблюдаются значительные периодические выбросы жидкости за пределы каверны. Эти результаты хорошо видны на соответствующих рисунках и в целом согласуются с известными экспериментальными и расчетными данными других авторов, полученных иными способами.

1. Бруязцкий Е. В., Костин А. Г., Никифорович Е. И. Моделирование полей скорости и давления в зоне прямоугольной каверны, расположенной на стенке плоского канала. Часть I // Прикладна гідромеханіка.– 2013.– Т. 15, № 3.– С. 25–36.
2. Rockwell D., Knisely C. Observation of the three-dimensional nature of unstable flow past a cavity // Phys. Fluids.– 1980.– **23**.– P. 425–431.
3. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование) // Под ред. Ермишина А. В. и Исаева С. А.– М.–СПб.: 2001.– 360 с.
4. Терехов В. И., Калинина С. В., Мшвидобадзе Ю. М. Экспериментальное исследование развития течения в канале с полусферической каверной // Сиб. физ. -тех. ж.– 1992.– Вып. 1.– С. 77–85.
5. Hiwada M., Kawamura T., Mabuchi J., Kumada M. Some characteristics of flow pattern and heat transfer past circular cylindrical cavity // JSMP.– 1983.– **26**, No. 220.– P. 1744–1753.
6. Воропаев Г. А., Воскобойник А. В., Воскобойник В. А., Гринченко В. Т., Исаев С. А., Розумнюк Н. В. Источники псевдозвуковых пульсаций давления при обтекании сферической лунки // Акустичний вісник.– 2008.– Вып. 11, № 3.– С. 27–49.
7. Knisely C., Rockwell D. Self-sustained low-frequency components in an impinging shear layer // Journal of Fluid Mechanics.– 1982.– **116**.– P. 157–186.
8. Shang K., Constantinescu G., Park S. Analysis of the flow and mass transfer processes for the incompressible flow past an open cavity with a laminar and fully turbulent incoming boundary layer // Journal of Fluid Mechanics.– 2006.– **561**, № 116.– P. 113–145.