

УДК 534(213.4-13)

ВОЛНОВАЯ СТРУКТУРА ПОТОКА В ТРУБЕ ПРИ НАЛОЖЕННЫХ ПУЛЬСАЦИЯХ РАСХОДА

***Болдырев С.В.**, аспирант*

*Филиал ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный
университет», г. Набережные Челны*

Харчук С.И., к.ф.-м.н., доцент

*Филиал ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный
университет», г. Набережные Челны*

Underminder@mail.ru

В системах управления, распределения и транспортировки газов в большей степени характерны нестационарные режимы нежели установившееся. Однако методы расчета и проектирования таких систем основываются на данных о параметрах стационарных или квазистационарных течений. В связи с ростом потребления энергоносителей и совершенствования систем управления, с точки зрения энергосбережения и повышения энергетической эффективности, необходимо иметь более точное представление о характере течений в нестационарных режимах. Одним из факторов, влияющих на преобразование течения газа в нестационарное, является изменение расхода потребителями. Поэтому, в настоящей работе для более глубокого понимания особенностей таких потоков исследуется относительно простое течение в длинной цилиндрической трубе с наложенными пульсациями расхода, вызванными периодическим открытием-закрытием заслонки.

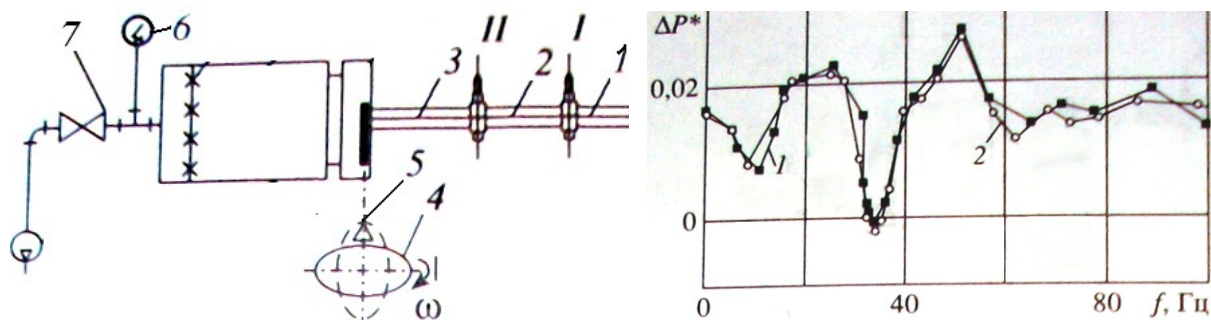


Рис.1. Схема установки (1, 2, 3 – предвключенный, измерительный и поствключенный участки цилиндрической трубы, 4 – заслонка, 5 – отверстие, 6 – вакуумметр, 7 – задвижка) и экспериментальная зависимость гидравлического сопротивления участка 2 от частоты наложенных пульсаций f при длине трубы $L = 8$ м и средних объемных расходах: 1 – $Q = 307,5$ м³/ч; 2 – $Q = 386,13$ м³/ч [2]

В экспериментах [1, 2] исследовано влияние наложенных пульсаций расхода на развитое турбулентное течение в трубе (рис.1). Обнаружено, что на некоторых резонансных частотах f гидравлическое сопротивление ΔP^* участка между сечениями I и II заметно отличается от квазистационарного значения. На некоторых режимах замечена деформация профилей осредненной скорости, вплоть до возникновения кратковременных обратных течений вблизи стенки.

Получены данные о пространственно-временной структуре рассматриваемого течения [3]. Измерения проведены при резонансных частотах (15,2; 26; 61 Гц) в трех сечениях, удаленных от входа в трубу: I – на 7 м; II-а – 7,52 м; II-б – 8,52 м. Отмечено, что недозаполненность профиля скорости соответствует фазе нарастания давления и сопровождается увеличением интенсивности пульсаций скорости. Обнаружен фазовый сдвиг между пульсациями параметров в сечениях II-а и II-б. Причем его знак и величина зависят как от частоты f , так и от расположения сечения относительно узлов и пучностей скорости.

По мнению авторов, сложность пространственно-временной структуры

течения обусловлена одновременным влиянием переноса пульсаций в направлении среднего движения и резонансных явлений, вызванных наложением пульсаций расхода на собственные акустические колебания столба воздуха в канале конечной длины.

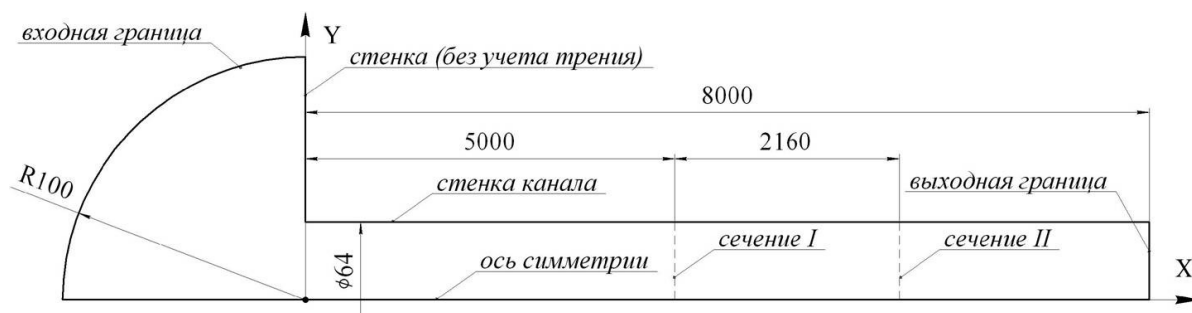


Рис.2. Схема расчетной области. Размеры и граничные условия

В данной работе численные эксперименты проведены в программном пакете STAR-CCM+ v4.04. В основу математической модели осесимметричного пульсирующего турбулентного течения вязкого сжимаемого газа положены осредненные по Рейнольдсу уравнения: Навье-Стокса, неразрывности, энергии, состояния идеального газа. Для замыкания системы уравнений использована стандартная высокорейнольдсовая линейная $k - \varepsilon$ модель турбулентности.

На рисунке 2 представлена схема расчетной области с выбранными граничными условиями. Размеры определены в соответствии с параметрами рабочего участка экспериментальной установки [1-3]. Для имитации процесса всасывания воздуха из неограниченного пространства перед входом в канал расположена дополнительная область в виде сектора с достаточно большим радиусом [4]. На входной границе определены полное давление 101325 Па и температура 20 °С, а также интенсивность турбулентности 0,001, относительная турбулентная вязкость $\mu_t / \mu = 10$. На выходе из трубы задана гармоническая функция изменения скорости по времени $U(t) = \langle U \rangle \cdot (1 + \beta_U \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t))$, где f и β_U – частота и относительная амплитуда колебаний ($\beta_U = 0,6$ [1-3]). Средняя по времени и по сечению

продольная компонента скорости $\langle U \rangle$ найдена по значению среднего объемного расхода $307,5 \text{ м}^3/\text{ч}$. На стенке канала поставлены условия «непроскальзывания» и «непроницаемости» (продольная и поперечная компоненты скорости равны нулю). Трение не учитывалось на стенке входной дополнительной области (условие «slip»). Для всех стенок выбрано условие отсутствия теплообмена с окружающей средой («adiabatic»).

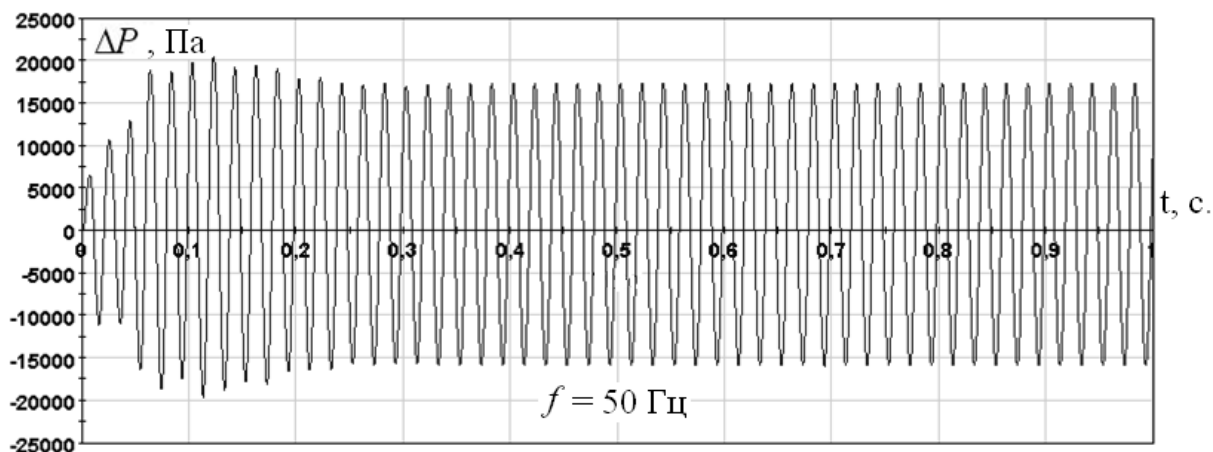


Рис.3. Изменение перепада статических давлений между сечениями I и II канала по времени для частоты наложенных пульсаций $f = 50 \text{ Гц}$

Дискретизация рабочей области осуществлена с помощью расчетной сетки из 38949 прямоугольных ячеек. На входном участке канала (500 мм) размер ячеек составил 2 мм, на остальной части трубы – 4 мм. Поскольку использование высокорейнольдсовой модели турбулентности и стандартных пристеночных функций подразумевает выполнение условия для безразмерного универсального параметра $y^+ = (30 \div 100)$, выполнено измельчение сетки вблизи стенки канала.

Полученное на начальном этапе квазистационарное решение использовано как начальное приближение для нестационарных задач. Численные эксперименты реализованы для нескольких значений частоты f : 10,8; 15,1; 19; 23,2; 34; 50; 138,5 Гц. Шаг по времени составил 0,0001 с (частота «опроса датчиков» 10 кГц) при полном времени моделирования 1-2 с (в зависимости от частоты f).

На рисунке 3 показана расчетная зависимость перепада давления между сечениями I и II $\Delta P = P_1 - P_2$ от времени при частоте $f = 50$ Гц. Из графика следует, что имеет место непрерывное знакопеременное изменение перепада давлений на исследуемом участке с частотой, равной частоте наложенных пульсаций расхода. Таким образом, управление заслонкой ниже по потоку привело к искажению мгновенных градиентов давлений, что совершенно незаметно при осреднении течения по времени.

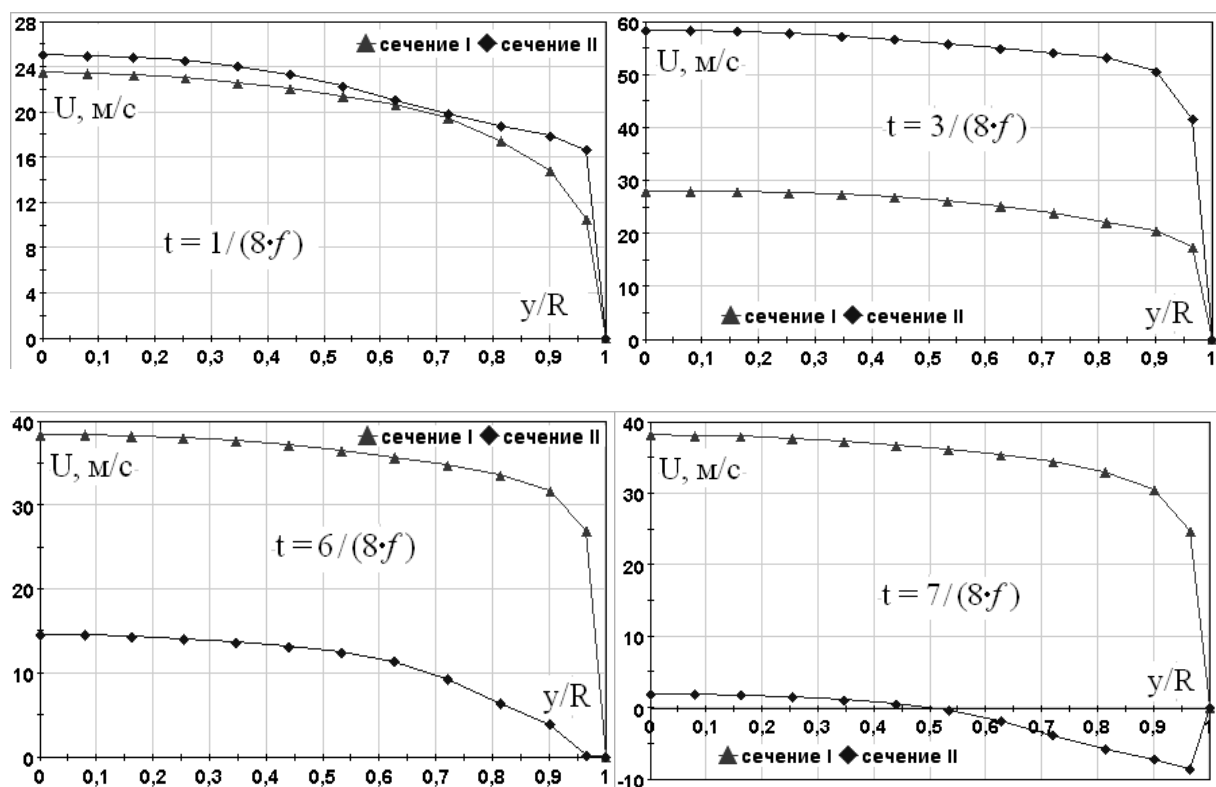


Рис.4. Профили продольной компоненты скорости потока в сечениях I и II канала в разные моменты времени при частоте наложенных пульсаций $f = 50$ Гц (R – радиус трубы)

Такое изменение продольного перепада давления оказывает существенное влияние на локальную и общую структуру потока для всего испытываемого участка. Так в начале открытия заслонки $t = 1/(8f)$ профили продольных скоростей U в контрольных сечениях I и II практически совпадают (рис.4). В момент времени $t = 3/(8f)$ скорости нарастают, причем в сечении II значительно быстрее, чем в сечении I, что связано с близостью

открывающейся заслонки. При $t = 6/(8f)$ картина кардинально меняется: в сечении II поток замедляется из-за закрытия заслонки, а в сечении I – этот эффект еще не сказался. В следующий момент времени $t = 7/(8f)$ в сечении II пристенные слои толщиной $0.5 \cdot R$ изменяют направление движения.

Зафиксированные изменения давлений и скоростей в контрольных сечениях во времени, вызванные пульсациями расхода, связаны с неоднородностью всего потока – с формированием волновых структур (рис.5). Видно, что на оси канала скорость и давление изменяются периодически, причем положение экстремумов по длине канала изменяется по времени. Примечательно, что существует постоянный сдвиг фаз между колебаниями скорости и давления.

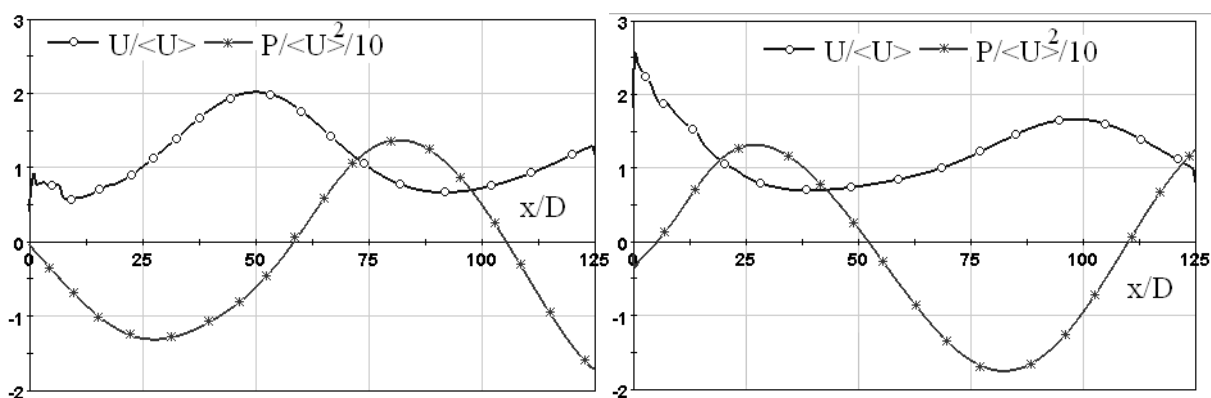


Рис.5. Изменение безразмерной продольной компоненты скорости $U/\langle U \rangle$ и приведенного статического давления $P/\langle U \rangle^2/10$ на оси канала при частоте наложенных пульсаций $f = 50$ Гц в разные моменты времени: левый график – $t = 1/(8f)$, правый график – $t = 5/(8f)$

Таким образом, в численном эксперименте выявлена волновая структура течения и получено качественное подтверждение эффектов, обнаруженных в физическом эксперименте [1-3]. Для дальнейшей верификации модели планируется использование более подробной расчетной сетки.

Список литературы

1. Давлетшин, И.А. Гидродинамические и тепловые процессы в пульсирующих турбулентных потоках: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / И.А. Давлетшин. – Казань, 2009. – 42 с.

2. Молочников, В.М. Экспериментальное исследование развитого турбулентного течения в круглой трубе с периодическими пульсациями расхода. Ч. 1. Потери давления и резонансные явления / В.М. Молочников, Л.А. Феоктистова, Г.В. Стинский, Н.С. Душин, О.А. Душина // Известия РАН. Энергетика. – 2005. – № 6. – С. 25–31.
3. Молочников, В.М. Экспериментальное исследование развитого турбулентного течения в круглой трубе с периодическими пульсациями расхода. Ч. 2. Пространственно-временная структура течения / В.М. Молочников, И.А. Давлетшин, Л.А. Феоктистова, Г.В. Стинский, Н.С. Душин, О.А. Душина // Известия РАН. Энергетика. – 2005. – № 6. – С. 32–38.
4. Болдырев, С.В. Обеспечение независимости численного расчета отрывного течения от размеров входной добавленной области / А.В. Болдырев, С.В. Болдырев, В.Л. Мулюкин, С.И. Харчук, С.С. Харчук // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – №6. – С. 22-25.