

Программа 3.5.2. Волновые процессы, организованные структуры и турбулентность в одно- и двухфазных потоках (координатор член-корр. РАН С. В. Алексеев)

В Институте теплофизики им. С. С. Куталадзе обнаружено подобие волновой структуры в доносном и уносном режимах кольцевого газожидкостного течения.

Согласно общепринятым представлениям, на поверхности обдуваемой турбулентным потоком газа пленки жидкости всегда присутствуют волны ряби, а при увеличении расхода жидкости возникают более высокие и быстрые волны возмущения. Возникновение волн возмущения приводит к срыву капель жидкости с поверхности пленки и уносу их в ядро газового потока.

При помощи высокоскоростной модификации метода флуоресцентной визуализации с высоким пространственным и временным раз-

решением исследована пространственно-временная эволюция волн в условиях наличия и отсутствия уноса (рис. 19).

Показано, что в уносных режимах все волны ряби генерируются на заднем фронте волн возмущения, после чего либо замедляются и поглощаются следующей волной возмущения, либо ускоряются и, достигнув фронта волны возмущения, разрушаются и уносятся газовым потоком.

В доносных режимах, как и в уносных, существуют два типа волн, существенно различающиеся по скорости, причем медленные вторичные волны также генерируются на заднем фронте более быстрых первичных волн. Таким образом, переход к уносу при росте

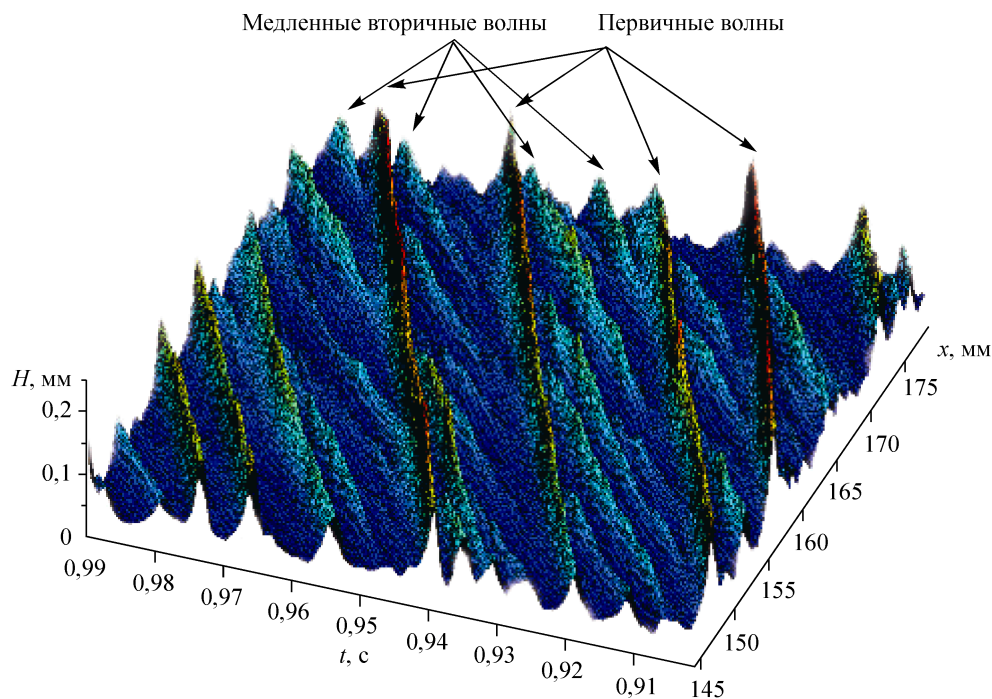


Рис. 19. Первичные и вторичные волны на пленке жидкости.

расхода жидкости происходит не благодаря появлению волн возмущения, как утверждает-ся в литературных данных, а благодаря резко-му возрастанию амплитуды первичных волн и связанному с этим появлению быстрых вто-ричных волн на поверхности первичных.

Полученные данные о характере про-странственно-временной эволюции волн могут быть использованы для создания принципи-ально новых подходов к моделированию вол-новой картины в кольцевом течении и явления уноса.

В том же Институте в рамках изучения волновых режимов течения пленки жидкости, стекающей по вертикальной плоскости, для широкого класса жидкостей (изотермические неньютоновские и ньютоновские неизотерми-ческие пленки) удалось свести задачу к иссле-дованию одного уравнения, описывающего эволюцию пространственных возмущений тол-щины пленки.

Для обобщенных ньютоновских жидко-стей реологическая связь между тензором на-пряжений и тензором скоростей имеет вид

$$\tau_{ik} = \varphi(I_2)D_{ik}.$$

Здесь $\varphi(I_2)$, имеющая размерность коэффици-ента динамической вязкости, — некоторая ска-лярная функция от второго инварианта тензора скоростей деформаций $I_2(v)$. В частности, к моделям такого типа относится одна из наибо-лее известных моделей нелинейно-вязких жид-костей — модель «степенной» жидкости.

При рассмотрении неизотермических пле-нок жидкости зависимостями плотности и теплоемкости жидкости от температуры пре-небрегается. Значения температур на твердой стенке и на свободной поверхности поддержи-

ваются постоянными. Коэффициенты вязкости и температуропроводности являются некото-рыми функциями температуры.

В случае длинноволновых возмущений и достаточно малых чисел Рейнольдса удалось получить новое нелинейное уравнение для оп-ределения возмущений толщины пленки h^0 :

$$h_\tau^0 + Ah^0 h_x^0 + Bh_{xx}^0 + D(\Delta h_{xx}^0 + n\Delta h_{zz}^0) = 0.$$

Здесь A , B , D и n — параметры, определяемые конкретным видом модели жидкости. Анали-тически и численно получены наиболее харак-терные решения уравнения (см. пример на рис. 20).

В том же Институте впервые выполнено детальное экспериментальное исследование структуры опускного течения жидкости при обтекании стационарного газового снаряда.

Исследование структуры снарядного га-зожидкостного течения, имеющего широкое приложение в технических устройствах, ос-ложняется нестационарным характером про-цесса. Выполнено экспериментальное исследо-вание единичной ячейки снарядного течения, включающей один газовый снаряд (пузырь Тейлора). С помощью электродиффузионного метода измерены распределения среднего по времени и пульсационного локального трения на стенке в области вокруг снаряда и после него. Показано, что в области течения вокруг снаряда происходит существенное подавление турбулентных пульсаций, связанное с ускоре-нием жидкости в кольцевой пленке вокруг снаряда. В области течения непосредственно за доньшком снаряда наблюдается значительное увеличение интенсивности пульсаций трения с наложением низкочастотной составляющей (рис. 21). Область возмущенного течения пос-

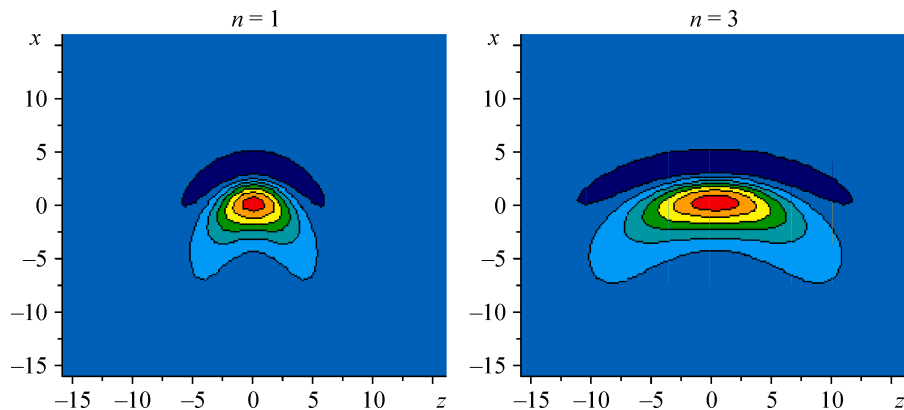


Рис. 20. Солитоны на пленке ньютоновской ($n = 1$) и «степенной» жидкости с показателем $n = 3$. Цветом показана толщина пленки.

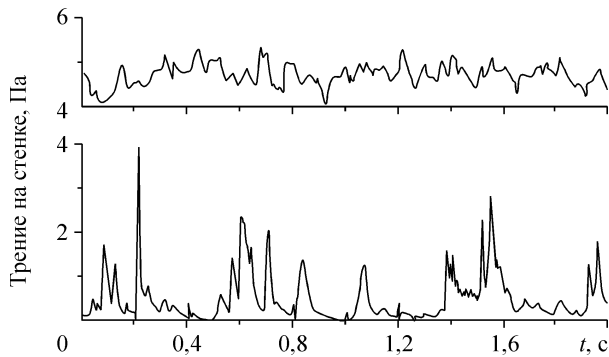


Рис. 21. Трение на стенке канала в кольцевой пленке вокруг снаряда (вверху) и за снарядом (внизу).

ле снаряда распространяется на расстояние 20—25 диаметров трубы от доньшка снаряда. Полученные результаты важны для разработки многомерных методов расчета двухфазных течений, необходимых для проектирования оборудования в энергетике, химической технологии и биотехнологии, пищевой и фармацевтической промышленности.

В том же Институте проведен цикл исследований по идентификации мод неустойчивости, возникающих в вихревых камерах сгорания, где закрутка потока используется для стабилизации пламени. Ранее было показано, что ключевым параметром винтовых вихрей является знак винтовой симметрии. При этом левовинтовые вихри индуцируют профиль осевой скорости типа следа (с провалом в центре, вплоть до появления возвратного течения), а правовинтовые вихри — струйный профиль. Именно левовинтовая структура закрученного потока может способствовать стабилизации пламени в вихревой горелке. Для прогнозиро-

вания резонансных явлений в камере сгорания важно также знать частоту пульсаций, связанную с прецессией вихря. Недавно был обнаружен эффект немонотонного изменения безразмерной частоты прецессии (числа Струхалия) в зависимости от степени закрутки потока S и дано объяснение на основе учета влияния на прецессию не только чистого вращения, но и осевого перемещения:

$$Sh \sim W/(2\pi) + C/h,$$

где W , C — угловая и осевая скорости движения винтовой структуры, h — шаг винтовой структуры. Для данной вихревой камеры сгорания было показано, что $W \sim S$, $C \sim \text{const}$. То есть второй член в формуле определяется только шагом винта. Изменение шага винта, измеренного с помощью кросскорреляционного анализа сигналов от пары акустических датчиков, приведено на рис. 22, *a*. Видно, что при малых S имеется достаточно быстрый рост шага винта с увеличением закрутки. Это дает уменьшение частоты прецессии при малых S (когда первое слагаемое сравнительно мало) вследствие влияния второго члена в формуле (рис. 22, *б*). При больших S шаг винта имеет тенденцию слабого изменения, и основной вклад дается первым членом, линейно растущим с S .

Полученные результаты важны для разработки новых методов контроля процессов горения, повышения эффективности использования топлива, уменьшения вредных выбросов, стабильности работы и безопасности камер сгорания.

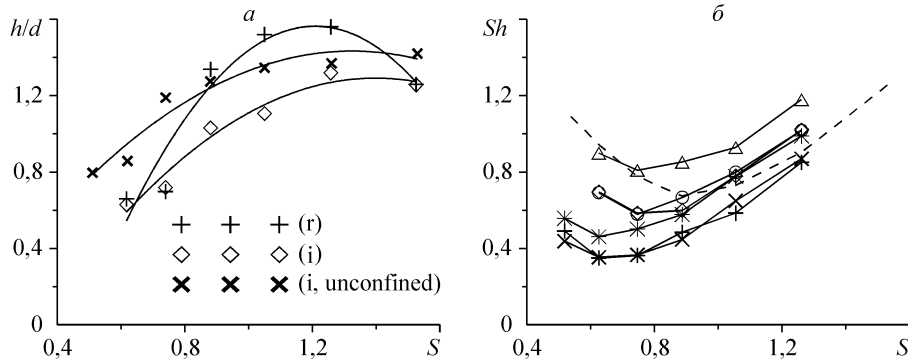


Рис. 22. Зависимости шага винтовой структуры (*a*) и безразмерной частоты прецессии вихря (*б*) от параметра крутки.

a: i — данные для изотермического, r — для реагирующего течения. *б*: Δ — $Re = 43000$ (r), \circ — $Re = 36000$ (r), \diamond — $Re = 24500$ (r), $*$ — $Re = 43000$ (r), \times — $Re = 36000$ (r), $+$ — $Re = 24500$ (r), $---$ — $Re = 40000$ (i , unconfined). Unconfined — истечение струи в свободное (неограниченное) пространство.