

УДК 532.542:532.501.132

А.В.Фафурин, Ю.А.Пустовойт, О.Б.Шагивалеева

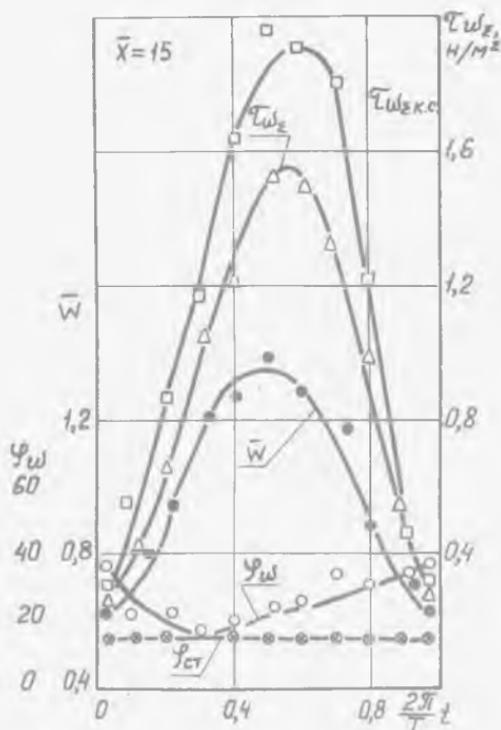
ВЛИЯНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ПОСТУПАТЕЛЬНО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ

Влияние нестационарности на пристеночные касательные напряжения при течении закрученных потоков и эволюция углов закрутки изучались на гидродинамическом стенде замкнутого типа. Локальная закрутка на входе в длинный цилиндрический канал внутренним диаметром 56 мм создавалась тремя лопаточными направляющими аппаратами с конструктивными углами выходных кромок 30, 45 и 60° соответственно. Нестационарный расход жидкости создавался пульсатором заслоночного типа. Диапазон исследованных частот 0,3-1,5 Гц.

Опыты проводились с одно- и двухфазными рабочими средами. В качестве дисперсной фазы использовался магний углекислый основной - мелкодисперсный порошок белого цвета со сферическими частицами, средний диаметр которых был равен 41 мкм. Плотность вещества 2160 кг/м<sup>3</sup>, максимальная средняя объемная концентрация в экспериментах составила 3%.

Пристеночные касательные напряжения  $\tau_{we}$  измерялись методом "трубка - выступ". Эволюция углов закрутки исследовалась по отклонению шелковых нитей, укрепленных на внутренней поверхности канала. Поведение шелковинок в динамических режимах регистрировалось на кинопленку камерой СКС, синхронизированной с шлейфовым осциллографом.

При незакрученном нестационарном течении в ускоренной части периода колебаний пристеночные касательные напряжения больше своих квазистационарных аналогов, т.е. величин касательных напряжений при тех же мгновенных значениях критерия  $Re$ , вычисленного по среднерасходной скорости. При действии отрицательного градиента скорости наблюдается обратная картина. С ростом частоты колебаний происходит увеличение абсолютных значений градиентов скорости, в соответствии с этим указанные эффекты носят более выраженный характер.



Р и с. 1. Изменение касательных напряжений и углов закрутки

локальный угол закрутки практически не зависит от  $Re$ , а полностью определяется интенсивностью закрутки на входе в канал и расстоянием до контрольного сечения, то ускорение потока приводит к уменьшению, а замедление - к увеличению мгновенных значений углов. Такое поведение параметров поступательно-вращательного течения объясняется воздействием на кинематическую структуру ускорения и замедления потока.

Анализ эволюции кинематической структуры в каналах конфузорного [1] и диффузорного [2] типа показал, что под воздействием ускорения происходит увеличение максимального значения в профиле суммарной скорости с одновременным перемещением ее в приосевую область.

В результате происходит относительное уменьшение градиента скорости и углов закрутки в пристеночной зоне. Воздействие замедления потока приводит к обратной картине. Соотношение параметров, показанное на рис. 1, и является результатом перестроек профиля скорости под воздействием отмеченных факторов.

Закрутка потока при нестационарном расходе коренным образом изменяет указанное соотношение между пристеночными касательными напряжениями в нестационарном режиме  $\tau_{\omega\varepsilon}$  и  $\tau_{\omega\varepsilon к.с}$  - касательными напряжениями в этом же контрольном сечении при тех же мгновенных значениях критерия  $Re$  и локального угла закрутки  $\Psi_{\omega}$  в условиях стационарного течения (квазистационарный аналог).

На рис. 1 показано изменение отмеченных параметров в течение одного периода колебания при частоте 0,5 Гц и закрутке потока на входе в канал направляющим аппаратом  $\Psi_{\kappa} = 30^{\circ}$ . Практически в течение всего периода пристеночные касательные напряжения меньше своих квазистационарных аналогов. Если в стационарном режиме течения

Увеличение частоты колебаний при постоянной интенсивности закрутки на входе приводит к уменьшению амплитуды изменения  $\bar{\tau}_{\omega\pm}$  и  $\bar{J}_{\omega}$  в течение одного периода. Одновременно происходит уменьшение средних за период величин пристеночных касательных напряжений. Сравнение величин  $\bar{\tau}_{\omega\pm}$  в двух контрольных сечениях, отстоящих друг от друга на расстоянии 10 диаметров канала, показывает, что в случае нестационарного течения касательные напряжения уменьшаются почти в два раза быстрее, чем в стационарном закрученном потоке. Это объясняется возрастанием потерь энергии потока вследствие многократных перестроек профиля скорости - нестационарность оказывает подавляющее воздействие на эффекты, вызванные закруткой потока, что особенно ярко проявляется в ускоренной части периода.

Пристеночные касательные напряжения и углы закрутки увеличиваются в течение всего периода колебаний с ростом интенсивности вращательного движения. Влияние ускорения на  $\bar{\tau}_{\omega\pm}$  носит тот же характер, что и при меньшей закрутке, но становится более выраженным, что объясняется большей степенью деформации поля скорости под действием центробежных сил.

Аналогичные исследования, проведенные для двухфазных потоков с объемной концентрацией твердых частиц до 3%, существенного влияния дисперсной фазы на отмеченные параметры течения не обнаружили.

Для изучения влияния закрутки, нестационарности и двухфазности на турбулентные флуктуации пристеночных касательных напряжений был использован электродиффузионный метод [3]. Регистрация измерительных сигналов и обработка информации производилась с помощью инженерно-вычислительного комплекса на базе микроЭВМ "Электроника-60".

Согласно [3] связь между пристеночными касательными напряжениями и предельным диффузионным током электрохимической ячейки имеет вид

$$\bar{\tau}_{\omega\pm} = \frac{3.16 \mu \bar{J}_{пред}^3}{F^3 d^3 C_{\infty}^3 D^2}, \quad (1)$$

где  $\mu$  - динамическая вязкость;

$F$  - константа Фарадея;

$D$  - коэффициент диффузии;

$d$  - диаметр датчика-катода;

$C_{\infty}$  - концентрация окислительных ионов в растворе.

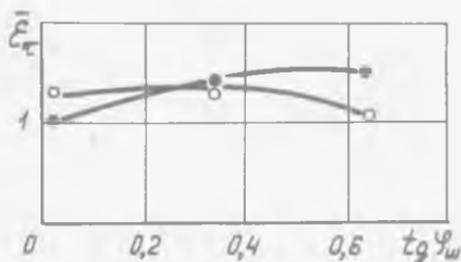
Если представить в (1)  $\bar{\tau}_{\omega\pm} = \bar{\tau}_{\omega\pm} + \tau'_{\omega\pm}$  и  $\bar{J}_{пред} = \bar{J}_{пред} + J'_{пред}$  ( $\bar{\tau}_{\omega\pm}$ ,  $\bar{J}_{пред}$  - средние значения величин,  $\tau'_{\omega\pm}$ ,  $J'_{пред}$  - пульсационные составляющие) и учесть, что  $\bar{\tau}_{\omega\pm} \gg \tau'_{\omega\pm}$  и  $\bar{J}_{пред} \gg J'_{пред}$ , то следует

$$\varepsilon_{\tau} = \frac{\sqrt{|\tau'_{\omega\pm}|^2}}{\bar{\tau}_{\omega\pm}} = 3 \frac{\sigma_J}{\bar{J}_{пред}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\bar{I}} = \sqrt{\left[ \sum_{i=1}^N (I_{пред i} - \bar{I}_{пред})^2 \right] / N}$  - среднеквадратическое отклонение пульсаций мгновенных значений тока  $I_{пред i}$  для  $N$  измерений.

Очевидно, что при описанном подходе важное значение имеют количество измерений и время реализации. При исследованиях динамических режимов время реализации ограничено, а понятие средних значений требует специального обоснования. Поэтому результаты исследования пульсационных характеристик  $\bar{\tau}_{w\epsilon}$  представлены в относительном виде  $\bar{\epsilon}_{\tau} = \bar{\epsilon}_{\tau} / \epsilon_{\tau 0}$ , где  $\epsilon_{\tau}$  - интенсивность турбулентности пристеночных касательных напряжений в рассматриваемых условиях,  $\epsilon_{\tau 0}$  - при течении незакрученного потока в том же канале и аналогичном режиме измерений.

На рис. 2 показано влияние вращения потока на интенсивность турбулентности пристеночного трения при однофазном и двухфазном стационарном течении. Как известно, закрутка потока приводит к увеличению интенсивности турбулентности скорости в пристеночной области цилиндрического канала [1]. Аналогичная картина наблюдается с интенсивностью турбулентности пристеночного трения. Появление дисперсной фазы привело к увеличению его на 20% при осевом течении, а при закрутке потока турбулентные



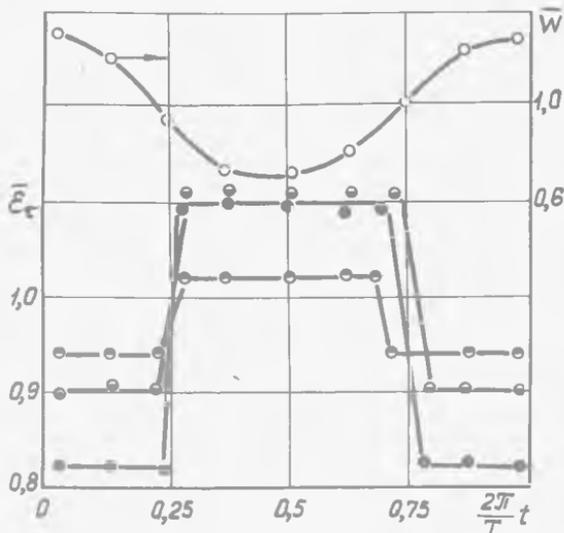
Р и с. 2. Турбулентные флуктуации трения в стационарном закрученном потоке:  $\frac{\bar{\epsilon} - \epsilon}{\bar{\epsilon}} = 0$ ;  $0 - 3\%$ ;  $\bar{\chi} = 15$

флуктуации трения быстро уменьшаются, что объясняется существенным возрастанием концентрации частиц в пристеночной области под действием центробежных сил.

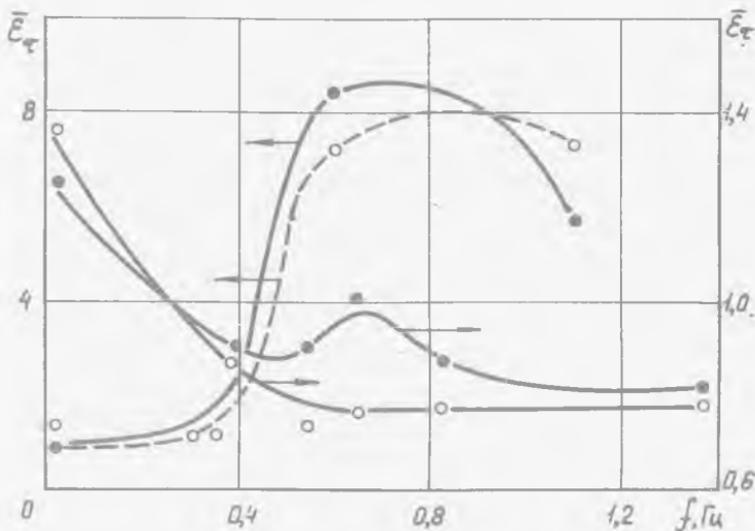
Изменение интенсивности турбулентных флуктуаций трения в течение одного периода колебаний относительно среднего значения за период при частоте  $f = 0,3$  Гц показано на рис. 3.

Верхняя кривая показывает закон изменения среднерасходной скорости  $\bar{W}$  на входе в канал. В области точки перегиба кривой изменения скорости наблюдается резкий скачок  $\bar{\epsilon}_{\tau}$  как при осевом, так и при закрученном течении. Следует отметить, что при  $\psi_{\kappa} = 0$  увеличение  $\bar{\epsilon}_{\tau}$  составило 30%, при  $\psi_{\kappa} = 30^{\circ}$  - 26%, а при  $\psi_{\kappa} = 60^{\circ}$  - 9%. Указанное обстоятельство говорит о стабилизирующем действии центробежных сил на пристеночное трение в нестационарном режиме.

Влияние закрутки и частоты на среднюю за период интенсивность турбулентности трения показано на рис. 4. Эта зависимость существенно нелинейна. Резкий перегиб кривых в районе частот 0,4-0,6 Гц может быть



Р и с. 3. Турбулентные флуктуации трения в нестационарном закрученном потоке:  $\bullet - \overline{\varphi}_K = 0^0$ ;  $\circ - \varphi_K = 30$ ;  $\ominus - \varphi = 60$ ;  $f = 0,3$  Гц



Р и с. 4. Влияние закрутки, нестационарности и двухфазности на интенсивность турбулентности пристеночных касательных напряжений  $\lambda = 15$

объяснен появлением на этих частотах второй гармоники в законе изменения среднерасходной скорости.

При подходе к частоте порядка 1 Гц первая и вторая гармоники соизмеримы по амплитуде, и в этот момент имеет место максимум. Далее амплитуда первой гармоники уменьшается и преобладает вторая -  $\bar{\epsilon}_2$  начинает уменьшаться.

Присутствие дисперсной фазы резко изменяет характер указанных кривых. Как при осевом течении, так и при закрутке потока с ростом частоты  $\bar{\epsilon}_2$  быстро падает и с частот порядка 0,5-0,6 Гц влияние вращения на  $\bar{\epsilon}_2$  проявляется очень слабо. Присутствие в потоке твердых частиц с плотностью, отличной от плотности несущей среды, и закономерности распределения дисперсной фазы гасят проявление эффектов, обусловленных особенностями гидродинамики в указанном диапазоне частот.

#### Л и т е р а т у р а

1. Щукин В.К., Халатов А.А. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах. - М.: Машиностроение, 1982. - 200 с.

2. Соу (K.L.SO). Явление завихрения в коническом диффузоре. - Ракетная техника и космонавтика, 1968, № 6, с. 20-28.

3. Накоряков В.Е., Бурдуков А.П. Электродиффузионный метод диагностики турбулентных потоков. Экспериментальные методы и аппаратура для исследования турбулентности. - Труды II Всесоюзного совещания. - Новосибирск, 1977, с. 25-42.

УДК 536.242

А.А.Халатов, А.Н.Боррото, В.Ф. Флока

ТЕПЛООБМЕН В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

СО ШНЕКОВЫМ ЗАВИХРИТЕЛЕМ С ЦЕНТРАЛЬНЫМ ОТВЕРСТИЕМ

Одним из распространенных способов начальной закрутки потока является использование лопаточных, шнековых, тангенциальных и тангенциально-лопаточных завихрителей, установленных на входе в канал [1]. Наиболее технологичными из них являются шнековые завихрители, которые используются при достаточно больших углах закрутки.

В сильнозакрученных потоках вследствие действия сил вязкости и затухания закрутки по длине в приосевой зоне канала формируется область обратных течений (рис. 1), на образование которой и поддержание ее существования затрачивается значительная механическая энергия [1]. Вследствие этого в ряде случаев теплообменные аппараты, работающие по прин-