

УДК 621.453.034.3:621.646.7

А.М. ГРУШЕНКО, А.Л. КИРЬЯНЧУК

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ МАССООБМЕНА В ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ТРАКТАХ С ВЗАИМНО ПЕРЕКРЕЩИВАЮЩИМИСЯ КАНАЛАМИ

Представлены некоторые особенности течения жидкостей в проточных трактах на основе взаимно перекрещивающихся каналов и особенности геометрической структуры таких трактов. Рассмотрены возможности интенсификации процессов смесеобразования в потоке при течении разнородных жидкостей по цилиндрическим вихревым трактам (ЦВТ). Предложена методика проведения экспериментальных исследований процессов смешения в ЦВТ, основанная на анализе гидродинамических процессов методами теории подобия, определен вид критериального уравнения зависимости характеристик смешения от реологических свойств смешиваемых жидкостей, характера их течения и геометрических характеристик смесительных устройств на основе трактов с взаимно перекрещивающимися каналами.

массообмен, смешение, смесеобразование, цилиндрические вихревые тракты, взаимно перекрещивающиеся каналы

Введение

На сегодняшний день применение альтернативных видов топлив получает все более широкое распространение.

Как правило, такие топлива являются смесевыми и их свойства во многом зависят от качества смешения компонентов. В связи с этим задача интенсификации процессов массообмена при смесеобразовании является актуальной.

1. Формулирование проблемы

Одной из разновидностей процессов смешения является смешение в потоке. Схематически этот процесс представляется следующим образом (рис. 1). По двум трубопроводам в камеру смешения подаются две жидкости с массовыми расходами \dot{m}_1 и \dot{m}_2 . По третьему трубопроводу из камеры поступает готовая смесь с расходом \dot{m}_3 . Как правило, перед входом в камеру смешения, жидкости дросселируются [1], а в самой камере смешения создается определенная гидродинамическая обстановка (закрутка потоков, соударение струй и пр.), которая и определяет качество смешения исходных жидкостей. По-

иск новых способов интенсификации процессов смешения в потоке является перспективным направлением не только для поршневых ДВС работающих на смесевых топливах, но и для других областей знаний таких как химический синтез, получение биотоплив, а также для решения аналогичных задач, связанных с получением гомогенных смесей.

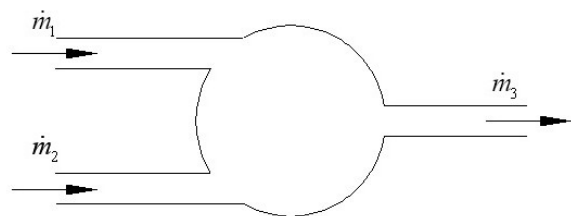


Рис. 1. Схема процесса смешения в потоке

2. Возможные пути решения

На интенсификацию процессов смешения, например двух жидкостей, могут влиять следующие физические явления:

- осесимметричные возмущения (волны Релея), возникающие под действие капиллярных сил;
- турбулентные пульсации, приводящие к взаимной диффузии жидкостей;
- кавитационные процессы в одной или двух

жидкостях при их течении по проточному тракту [2].

Вероятно, что одновременное воздействие нескольких таких факторов может в значительной степени интенсифицировать процесс смесеобразования. Реализация этого возможна, на наш взгляд, в трактах с взаимно перекрещивающимися каналами [3].

3. Особенности течения со смешением в трактах со взаимно перекрещивающимися каналами

Известно, что интенсивность смешивания жидкостей выше в случае турбулентного характера их течения [4]. Как показывают исследования [3], при тении жидкости в проточных трактах с взаимно перекрещивающимися каналами турбулентный характер движения жидкости реализуется при $Re_{кр} = 500 \dots 600$, что существенно меньше критического числа Рейнольдса для течения в гладких трубах, $Re_{кр} \approx 2300$ [5, 6]. Еще одной особенностью таких трактов является возникновение на определенных режимах течения кавитационных процессов за счет образования вихревых жгутов в зоне перекрещивания каналов. Этот факт был обнаружен при исследовании форсунок на основе таких трактов. Таким образом, в трактах с взаимно перекрещивающимися каналами реализуется еще одно физическое явление, способствующее улучшению смешения жидкостей.

Если каналы выполнены на цилиндрических поверхностях, то такие устройства называются цилиндрическими вихревыми трактами (ЦВТ). Рассмотрим геометрическую структуру ЦВТ подробнее.

На рис. 2 представлена схема формирования структуры тракта с взаимно перекрещивающимися каналами. Стрелками показано направление движения жидкости.

В местах наложения каналов образуются полости (ячейки). Таким образом, формируется характерная ячейковая структура.

Известно [4], что тракты имеют характерно выраженный начальный участок, который определяет входное гидросопротивление и характеризуется неустановившимся турбулентным режимом течения. За начальным участком ЦВТ, следует участок установившегося турбулентного течения, величина потерь давления в котором автомодельна по числу Рейнольдса.

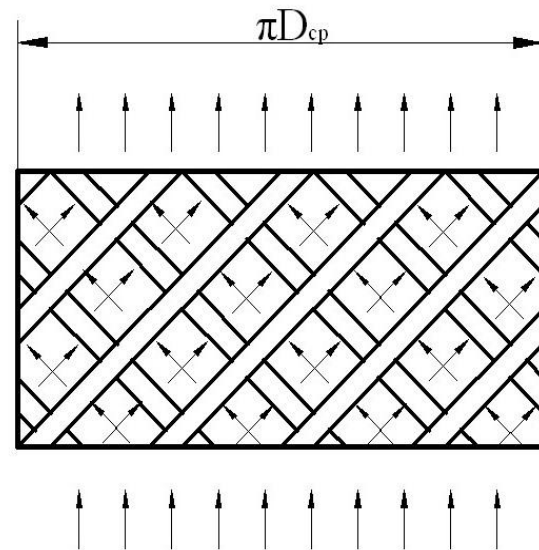


Рис. 2. Схема формирования ячейковой структуры ЦВТ (развертка по среднему диаметру сопряжения $D_{ср}$)

Если длина тракта равна длине начального участка, то такие устройства называются короткими ЦВТ. В выходном сечении таких устройств поток стабилизирован и их можно рассматривать как турбулентные дроссели [3].

Очевидно, что реализация смешения жидкостей в таких трактах должна осуществляться не только на начальном участке, но и на участке стабилизированного течения, протяженность которого будет определять качество смешения и затраты на прокачку для его осуществления. Другими словами речь идет о минимизации потерь на смешение в ЦВТ, то есть определение минимальной длины ЦВТ, достаточной для осуществления процессов смесеобразования в соответствии с решаемой задачей.

Для выработки стратегии экспериментальных исследований процессов смешения в трактах с вза-

имно перекрещивающимися каналами необходимо определить критерии, которые могли бы характеризовать эти процессы.

Рассмотрим схематично вихревой тракт (рис. 3) как некий «черный ящик», на входе в который величины \dot{m}_1 и \dot{m}_2 – характеризуют массовые расходы смешиваемых жидкостей, которые подводятся к своей группе каналов, а \dot{m}'_1 и \dot{m}'_2 – расходы смесей жидкостей, выходящих из этих же групп каналов соответственно.

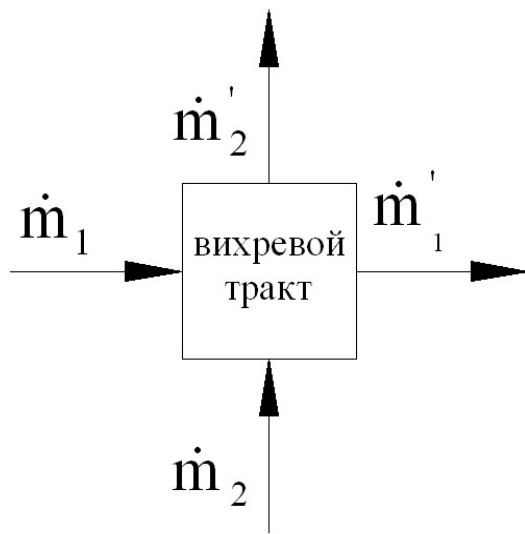


Рис. 3. Схема смешивания в ЦВТ

Очевидно, что расходы жидкостей на выходе из каждой группы каналов могут быть записаны как:

$$\dot{m}'_1 = \dot{m}_1 - \Delta\dot{m}_1 + \Delta\dot{m}_2; \quad (1)$$

$$\dot{m}'_2 = \dot{m}_2 - \Delta\dot{m}_2 + \Delta\dot{m}_1, \quad (2)$$

где $\Delta\dot{m}_1$ – часть расхода жидкости из первой группы каналов, которая, участвуя в смешении (массообмене между группами каналов), перешла из первой группы каналов во вторую;

$\Delta\dot{m}_2$ – часть расхода жидкости из каналов второй группы, которая перешла в процессе массообмена из каналов второй группы в каналы первой.

Очевидно, что процесс массообмена между группами каналов можно характеризовать двумя величинами – изменением расхода жидкости в первой

группе каналов $\dot{m}'_1 - \dot{m}_1$ и во второй группе каналов $\dot{m}'_2 - \dot{m}_2$.

Не трудно показать, что изменение расходов жидкости первой группы каналов может происходить только за счет изменения расхода жидкости второй группы каналов:

$$\dot{m}'_1 - \dot{m}_1 = \dot{m}_2 - \dot{m}'_2. \quad (3)$$

Из выражений (1) и (2) следует, что разница расходов $\dot{m}'_1 - \dot{m}_1$ и $\dot{m}_2 - \dot{m}'_2$ равна $\Delta\dot{m}_2 - \Delta\dot{m}_1$. Таким образом из выше изложенного следует, что процесс массообмена в вихревых трактах полностью характеризуется величиной $\Delta\dot{m}_2 - \Delta\dot{m}_1$, физический смысл которой состоит в том, что она полностью определяет суммарный эффект процессов массообмена жидкостей между каналами разных групп.

Так как суммарный расход жидкостей \dot{m} , протекающих через вихревой тракт равен

$$\dot{m} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2, \quad (4)$$

то отношение

$$\frac{(\Delta\dot{m}_2 - \Delta\dot{m}_1)}{\dot{m}}, \quad (5)$$

может быть выбрано в качестве безразмерного критерия, характеризующего интенсивность процессов массообмена в трактах с взаимно перекрещивающимися каналами.

Обозначим

$$\varepsilon = \frac{\Delta\dot{m}_2 - \Delta\dot{m}_1}{\dot{m}} = \frac{\Delta\dot{m}_2 - \Delta\dot{m}_1}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} = \frac{\Delta\dot{m}_2 - \Delta\dot{m}_1}{\dot{m}'_1 + \dot{m}'_2}. \quad (6)$$

Критерий ε имеет простой физический смысл – это относительная массовая доля жидкостей, формирующая суммарный эффект процессов массообмена от их суммарного массового расхода.

Необходимо отметить удобство использования критерия ε для экспериментальных исследований в зависимости от того, какие жидкости смешиваются (растворимые друг в друге или нет).

Действительно, для не смешиваемых жидкостей удобно измерять $\Delta\dot{m}_1$, $\Delta\dot{m}_2$, \dot{m}_1 , \dot{m}_2 ; для смешиваемых – \dot{m}'_1 , \dot{m}'_2 , \dot{m}_1 , \dot{m}_2 и плотность смешанных жидкостей – в обоих случаях по измеренным величинам достаточно просто осуществляется пересчет величины ε .

4. Экспериментальные исследования

Основываясь на выводах работы [3], в качестве объекта исследований был выбран симметричный цилиндрический вихревой тракт, с полукруглыми каналами, выполненными в виде многозаходных винтовых канавок на корпусе и втулке. Угол скрещивания каналов ψ , выбранный из рекомендуемого диапазона [3], составляет 90° .

Для проведения качественного и количественного экспериментов была разработана плоская модель ЦВТ (рис. 4) с аналогичными геометрическими параметрами и эквивалентным диаметром каналов d_3 , равным 3 мм, а также методика проведения экспериментального исследования. Разработанная методика предусматривает интегральную оценку массопереноса разнородных жидкостей (смешиваемых и не смешиваемых), которые подаются по индивидуальным магистралям к разным группам каналов, как в случае описанной выше плоской модели, так и в случае ЦВТ. Для обеспечения возможности визуализации, модель выполнена из прозрачного материала.

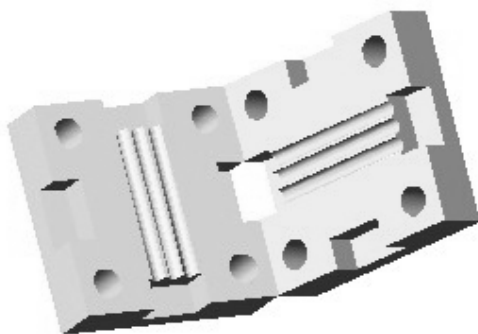


Рис. 4. Проточная часть модели

Количественная оценка смешения осуществлялась весовым методом по средней плотности, для смешиваемых жидкостей, и объемным методом для не смешиваемых жидкостей, при отборе проб из соответствующих групп каналов на выходе из тракта.

5. Интерпретация и оценка результатов экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования процессов смешения в ЦВТ жидкостей с различными реологическими свойствами представляют существенные трудности из-за необходимости организации многофакторного эксперимента.

Для минимизации плана эксперимента используют теорию подобия, что позволяет не только существенно снизить материальные затраты на проведение эксперимента, но и получать его обобщенные результаты, научно-практическая ценность которых существенно выше эмпирических зависимостей, справедливых в ограниченном диапазоне определяющих размерных параметров.

Обобщенное уравнение зависимости критерия массообмена ε от определяющих размерных параметров можно записать в следующем виде:

$$\varepsilon = f(\mu_1, \mu_2, v_1, v_2, d_3, l), \quad (7)$$

где μ_1, μ_2 – динамические вязкости смешиваемых жидкостей;

v_1, v_2 – скорости смешиваемых жидкостей на входе в соответствующие группы каналов;

l – осевая протяженность цилиндрического вихревого тракта;

d_3 – эквивалентный диаметр канала (геометрия каналов обеих групп одинакова).

Согласно π -теореме [7], зависимость безразмерного критерия ε от шести размерных параметров может быть заменена на зависимость ε от трех безразмерных критериев

$$\varepsilon = f\left(\text{Re}_1, \text{Re}_2, \frac{l}{d_3}\right), \quad (8)$$

в которой числа Рейнольдса характеризуют течения жидкостей с разными реологическими свойствами в соответствующих группах каналов, а величина $\frac{l}{d_3}$ равна безразмерной осевой протяженности вихревого тракта, нормированной осевой протяженностью одного пояса скрещивания [3]. Зависимость (8) позволяет реализовать стратегию экспериментальных исследований.

Оценка интенсивности массообмена в ЦВТ по ε для трактов различной протяженности $\bar{l} = \frac{l}{d_3}$ должна проводится в зависимости от чисел Рейнольдса Re_1 и Re_2 . В свою очередь это означает, что результаты экспериментальных исследований должны отображаться в трехмерных координатах ε , Re_1 , Re_2 , для каждого исследуемого образца цилиндрических вихревых трактов.

Заключение

Критериальный анализ особенностей течения разнородных жидкостей в цилиндрических вихревых трактах еще раз подтвердил вывод об общности канальных течений, то есть о том, что вихревые тракты являются самым общим случаем таких течений. Процессы же массообмена в таких трактах носят ярко выраженный индивидуальный характер и отличаются от процессов смешения по механизму k - ε турбулентности.

Сложность визуализации процессов массопереноса в ЦВТ и их физического моделирования делают экспериментальные исследования единственным

результативным методом интегральной оценки процессов массопереноса в трактах с взаимно перекрещивающимися каналами, а результаты факторного анализа с применением теории подобия позволяют минимизировать объем экспериментальных исследований и получать обобщенные результаты таких исследований.

Литература

1. Кирилин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 416 с.
2. Parag R. Gogate, Rajiv K. Tayal, Aniruddha B. Pandit. Cavitation: a technology on the horizon // CURRENT SCIENCE, Vol. 91, № 1, 10 July 2006. – P. 35-46.
3. Грушенко А.М. Определение потерь в цилиндрических вихревых трактах // Проблемы машиностроения. – К. – 1987. – Вып. 28. – С. 96-98.
4. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. – Л.: Машиностроение, 1969. – 524 с.
5. Большаков В.А., Попов В.Н. Гидравлика. – К.: Выща школа, 1989. – 215 с.
6. Дейч М.Е., Зарякин А.Е. Гидрогазодинамика. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 384 с.
7. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1965. – 388 с.

Поступила в редакцию 28.052008

Рецензент: д-р ф.-м. наук, проф. А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.