Генерирование электрических управляющих сигналов, а также осциллографирование динамических параметров работы форсунки осуществлялось с помощью управляющего измерительного комплекса EControl V. 3 (г. Ярославль)

Характеристика впрыскивания определялась с помощью датчика, выполненного по схеме «Бош», чувствительным элементом являлся пъезодатчик давления Т-2500.

Для уменьшения влияния электрических помех на результаты испытаний осциллограммы характеристик впрыскивания аппроксимировались численным методом.

Для минимизации случайных погрешностей и влияния электрических помех на результаты измерений при проведении осциллографирования с помощью управляющего измерительного комплекса, динамические параметры определялись как средние значения по 30-ти последовательно взятым циклам на установившемся режиме.

На рисунках 2 и 3 приведены характеристики впрыскивания топлива. Сопоставление которых свидетельствует о хорошем совпадении расчета с экспериментальными данными.

Расхождение между расчетными и экспериментальными значениями цикловых подач при изменении давления в аккумуляторе P_a от 30 до 120 МПа и диапазоне продолжительности управляющего импульса $\tau = 1,5 \dots 2,0$ мс не превышает 5,5 %,что позволяет использовать разработанную математическую модель и программу гидродинамического расчета анализа аккумуляторных топливных систем сложных конструкций, сравнительные показатели представлены в таблице:

P _a , M∏a	t _{упр} , мкс	Расчет q _ц , мм ³	Эксп. q _ц , мм ³	Расхождение б %
120	2000	100,3	104	3,5
90	1500	93,7	97,3	3,7
60	1600	64,5	68	5,1
30	1600	44,6	46	3,1

Литература:

1. Корнилов Г.С., Мазинг М.В., Пинский Ф.И., Голубков Л.Н. Аккумуляторная система топливоподачи как средство улучшения экономических и экологических показателей автомобильных дизелей //Экология двигателя и автомобиля: Сб. научн.тр. /НАМИ. – М., 1998. С.141-150.

ВИХРЕВАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ И КАВИТАЦИЯ В СОПЛОВОМ КАНАЛЕ ДИЗЕЛЬНОЙ ФОРСУНКИ

Скоморовский С.А. (Комсомольский-на-Амуре ГТУ) Гаврилов В.В., Семидетнов Н.В.

(Санкт-Петербургский государственный морской технический университет) Голованов М.Н. (Новосибирской государственной академии водного транспорта)

Эффективности математического моделирования локальных внутрицилиндровых процессов особенно существенно препятствует малая изученность процессов первичного распада струи в сопловом канале дизельной форсунки.

Исследования последних десятилетий позволяют полагать определяющим фактором первичного распада развитие турбулентности потока в сопловом канале. Ряд исследователей предложили уравнения, в том числе и теоретические, для определения мелкости распыливания в зависимости от интенсивности турбулентности. Однако практическое применение этих уравнений крайне затруднено, так как сведения о турбулентной структуре потока в сопловом канале носят фрагментарный характер.

Основной причиной подобной ситуации является полуэмпирический характер теории турбулентности. В тоже время, экспериментальное изучение турбулентности встречает значительные затруднения из-за отсутствия инструментария с достаточно высокой разрешающей способностью и быстродействием, обладающего способностью фиксировать сложную структуру с высокой локальной нестационарностью. Эти затруднения становятся ещё более значимыми в случае кавитации, возникающей в ядрах турбулентных вихрей. Исследование литературных источников показало, что вихревая кавитация является «белым пятном» как для теории турбулентности, так и теории кавитационных течений.

В работе [1] показано, что подобие режимов истечения в соплах дизельных форсунок по коэффициентам скорости и расхода определяется безразмерным комплексом, представляющий собой относительный скоростной напор:

 $K = (P_1 - P_2) / P_2 = \rho U_2^2 / 2 P_{2,.}$

где: P_1 и P_2 – давления перед и за соплом соответственно; ρ – плотность топлива; U_2 – теоретическая скорость в выходном срезе сопла.

Турбулентные вихри в потоках жидкости легче всего обнаруживаются при возникновении в них кавитации. Подобное явление было обнаружено авторами работы [1] при стационарном истечении топлива в среду топлива с высоким противодавлением P₂ до 10 МПа. Из сопловых отверстий вырывалось матовое облачко паровых пузырьков. При высоком противодавлении среды, в которую происходило истечение, кавитационные разрывы сплошности потока возможны только при вихревой кавитации.

Турбулентность потока в вихревой динамике разделяют на два вида: стохастическую турбулентность и вихревую турбулентность. Положим, что турбулентный вихрь в потоке представляет собой аэродинамическое циркуляционное течение в форме сфероида с тороидальным ядром [2,3]. Масса турбулентного вихря на 95 % сосредоточена в его сфероидальной области, называемой также «атмосферой вихря». Турбулентность в «атмосфере вихря» имеет преимущественно стохастический характер, а основная доля циркуляции (завихрённости) заключена в тороидальном ядре. При этом примем, что распределение скоростей в поперечном сечении ядра вихревой нити подчиняется схеме цилиндрического вихря Ренкина (твердотельное вращение в ядре). Из условия непрерывности поля скоростей примем, что самоиндуцированная скорость движения кольцевого вихря V относительно потока равна тангенциальной скорости на границе вязкого ядра вихря V₀. Для оценки интенсивности турбулентности введем безразмерный комплекс – относительную тангенциальную скорость на границе ядра вихря $\theta = V_{\theta} / U_2$. Отсюда, интенсивность турбулентности, вызываемая вихревым кольцом, составляют величину $\varepsilon = 2 \cdot \theta$.

Давлений на оси ядра цилиндрического вихря Ренкина в выходном сечении сопла описывается уравнением

 $P_{min} = P_2 - \rho V_{\rho}^2$

Если принять $P_{min}=0$, то условие возникновения кавитации на оси ядра вихревой нити в безразмерном виде будет выглядеть следующим образом

 $K_* = 1 / 2 \theta^2 = 2 / \epsilon^2.$

В монографии [4] приведен пример расчета отрывного течения на входном участке воздухозаборника с острыми входными кромками. Результаты расчета хорошо согласуются с приведенными там же опытными данными, полученными при числе Рейнольдса $3,4*10^5$. Интенсивность турбулентности достигает значения 40 %. С помощью лазерного доплеровского анемометра (ЛДА) нами были проведены измерения осевых компонент скорости частиц топлива на срезе сопла дизельной форсунки в фиксированной точке потока при стационарном истечении в среду сжатого воздуха. Размах варьирования, отнесенный к максимальным скоростям частиц в выборке, составил также 40 % в широком диапазоне значений относительного скоростного напора [5]. При такой интенсивности турбулентности ($\varepsilon = 0,4$) кавитация на оси ядра вихревой нити должна возникать при значении K_{*} = 12,5.



Рис.1. Зависимость дальнобойности струи от максимального давления впрыска (d_c = 0,4 мм; τ = 1,5 мс): 1 – υ = 12 мм²/c; 2 – υ = 22 мм²/c; 3 – υ = 32 мм²/c; 4- υ = 42 мм²/c.

Вихревая кавитация оказывает влияния и на баллистику распыленной дизельной струи. На рис.1 приведены зависимости дальнобойности распыленной струи от максимального давления впрыска

при различной вязкости топлива v в диапазоне от 12-ти до 42 мм²/с, построенных по уравнению регрессии, приведенном в работе [6]. Уравнение регрессии было получено на основе опытных данных, полученных при впрыске мазута Φ -5 насосфорсункой дизеля ЧН 30/38 в среду сжатого воздуха с постоянным давлением P₂, равным 2,2 МПа. Значения дальнобойности приведены на момент времени τ , равном 1,5 мс от начала впрыска, примерно соответствующий периоду задержки воспламенения в дизеле типа ЧН 30/38. Из всех кривых, представленных на рисунке, особого внимания заслуживает зависимость для кинематической вязкости v, равной 12 мм²/с, на которой наиболее явно наблюдается экстремум.

Анализ осциллограмм давлений перед сопловыми отверстиями показал, что экстремум соответствует среднему значению за время т, равному 1,5 мс, относительному скоростному напору К, равному 12,5 и среднему числу Рейнольдса Re, равному 3500. Это значение К соответствует возникновению кавитации в ядре вихревой нити с θ , равным 0,2. С ростом вязкости значение среднего числа Рейнольдса Re уменьшается, при этом значение К, при котором наблюдается экстремум, возрастает.

В работе [2] предложен новый метод исследования нестационарных процессов в турбулентном вихревом кольце, основанный на экспериментальной диагностике его звукового поля. Разработана теоретическая модель турбулентного вихревого кольца, в соответствии с которой турбулентные пульсации в «атмосфере вихря» пассивно привязаны к изгибным колебаниям ламинарного вихревого ядра, а излучение звука турбулентного вихревого кольца определяется только собственными колебаниями его ядра. Теоретическая частота (Гц) излучение звука определяется через измеряемые в эксперименте параметры вихревого кольца:

$$\mathbf{f} = \frac{\mathbf{v}}{\pi \cdot \mathbf{R} \cdot \mu^2 \cdot \left(\ln \left(\frac{8}{\mu} \right) - \frac{1}{4} \right)},$$

где: V – самоиндуцированная скорость вихревого кольца; R – радиус вихревого кольца; µ=а/R – параметр вихревого кольца; а – радиус ядра вихря. Проведенные акустические эксперименты в заглушенной (безэховой) камере ЦАГИ показали, что измеренное акустическое излучение вихревого кольца удовлетворительно соответствует теоретическому значению. На основе теоретических и экспериментальных исследований сделан вывод, что звуковое поле определяется малыми колебаниями ядра вихря, которые оказываются причиной не только турбулентного движение частиц жидкости с большими амплитудами и в широком диапазоне частот во всей атмосфере вихревого кольца, но и звукового излучения в достаточно узком диапазоне частот.

Свойства реальных турбулентных вихревых колец позволяют рассматривать их как основные элементы турбулентности, наиболее отчетливо проявляющиеся в форме когерентных структур на фоне мелкомасштабной турбулентности [3]. Такой подход положен в основу метода дискретных вихрей [4]. Имеются большие сложности в экспериментальном подтверждении предполагаемой структуры турбулентности, поскольку она связана с выявлением согласованности в поле завихрённости (а не скорости). Следует отметить, что в сопловом канале дизельной форсунки, за входной кромкой, образуется зона отрыва. Как известно, за зоной отрыва всегда образуется когерентные турбулентные структуры.

Для исследования структуры потока при стационарном течении дизельного топлива в плоской оптически прозрачной модели соплового канала была создана специальная установка. Проливка осуществлялась от поршневых пневмогидравлических аккумуляторов. Этим было исключено воздействие пульсаций давления и вибраций на процесс формирования турбулентной структуры потока в канале. Плоская оптически прозрачная модель изготовлена из стальной пластины толщиной 2 мм (см. рис.2.). Пластина 1 вклеена между двумя толстыми стеклами, в одной из которых выполнены каналы 2 и 3 отвода и подвода топлива. При этом был обеспечен оптический доступ для наблюдения и фоторегистрации структуры потока в модели соплового канала. Для регистрации акустического излучения на торце пластины установлен пьезодатчик 4.

Модель соплового канала имела ширину канала 1 мм при длине 6,5 мм. Визуальные наблюдения показали, что кавитационные разрывы сплошности возникают в тонких сдвиговых слоях, срывающихся с острых входных кромок при К, менее 2х. Эти слои разграничивают ядро течения и зоны отрыва. При К, более 10-ти, кавитационные разрывы сполошности возникают в слоях смешения струи за соплом.

На рис.3. приведены результаты измерений частоты акустической эмиссии мо-

дельного соплового канала. Акустико-эмиссионная аппаратура работала в наиболее простом и испытанном режиме – регистрировалось частота импульсов с амплитудой, превосходящей определённый заранее установленный уровень.



Рис. 2. Плоская модель соплового канала: 1 – пластина; 2 и 3 – каналы отвода и подвода топлива; 4 – пьезодатчик.

Сравнение акустического излучения ядра турбулентного вихревого кольца с акустической эмиссией плоского модельного сопла можно сделать, если сделать оценку радиуса ядра вихря. Локальное (турбулентное) число Рейнольдса энергосодержащих турбулентных вихрей $Re_{T} = 100$ [7]. В работе [8] показано, что для ядер вихрей безразмерная комбинация Γ/ν играет роль числа

Рейнольдса (здесь: Г – циркуляция; v – кинематический коэффициент вязкости).

 $a = Re_T v/2\pi$.

Приняв параметр вихревого кольца $\mu = 0,12$ [2], можно сделать теоретическую оценку частоты акустического излучения когерентных турбулентных кольцевых вихрей в сопловом канале (см. кривую 2 на рис.3.). Результаты теоретической оценки удовлетворительно согласуются с опытными данными акустической эмиссии сопла только до значения K = 2. При K > 2 в сопле начинается кавитация и теоретическая кривая расходится с экспериментальными данными. Анализ литературных источников показывает, что динамика турбулентных вихревых колец, при возникновении в них кавитации, совсем не изучена. Отмечается лишь только, что такие вихревые кольца крайне неустойчивы и быстро распадаются.

Полное решение проблемы изучения турбулентной структуры потока в сопловом канале и первичного распада требует прямого сравнения теоретических и экспериментальных результатов.





При этом особую роль приобретает компьютерное моделирование, с помощью которого возможно выявление таких тонких особеннотурбулентной стей структуры течений, которые с трудом фиксируются с помощью современных экспериментальных методов. Однако предстоит непростое экспериментальное доказательство адекватности теоретических моделей, описывающей процессы возникновения и развития турбулентности, а затем и первичного распада струи в сопловом канале дизельной форсунки.

Литература:

- 1. Трусов В.И., Дмитриенко В.П., Масляный Г.Д. Форсунки автотракторных дизелей. М.: Машиностроение, 1977. 167с.
- 2. Копьев В. Ф., Чернышев С. А., Колебания вихревого кольца, возникновение в нем турбулентности и генерация звука, Усп. Физ. наук, 2000 (170), 7, 713-742
- 3. Русаков Ю.С. Вихревое кольцо как прообраз свободных турбулентных течений и когерентных структур// Труды международной конференции "Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность", 23 25 ноября, 2004 г. М.: Институт космических исследований РАН (<u>http://sodar.obninsk.org</u>; <u>http://www.iki.rssi.ru/mss04/con2.htm</u>)
- 4. Белоцерковский С.М., Гиневский А.С. Моделирование турбулентных струй и следов на основе метода дискретных вихрей. М.: Физматгиз, 1995. 368 с.
- Семидетнов Н.В., Скоморовский С.А. Применение лазерного доплеровского измерителя скорости для исследования процесса смесеобразования в дизелях// Материалы краткосрочного семинара «Применение лазеров в промышленности в свете решений XXVII съезда КПСС», 11-12 декабря 1987 г. Л.: Ротапринт ЛДНТП, 1987. с.39-44.
- 6. Астахов А.Н., Гаврилов В.В., Красильников В.В., Салин М.Ю. Исследование процесса распыливания тяжелого топлива насос-форсункой форсированного среднеоборотного дизеля. //Тр. ЛКИ. 1987, с. 116-126.
- 7. Турбулентность: принципы и применение// Под ред. У. Фроста, Т. Моулдена. Пер. с англ. М.: Мир, 1980.-526 с.
- 8. Гольдштик М.А. Вихревые потоки. Новосибирск: Наука, 1981. 336с.

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА РАСПЫЛИТЕЛЕЙ ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ ТОПЛИВНЫХ СТРУЙ

Еськов А.В., Матиевский Д.Д. (АлтГТУ им. И.И. Ползунова); Дробышев О.В. (ООО «СКБ АЗПИ»)

Эффективным средством улучшения топливной экономичности и снижения токсичности отработавших газов автотракторных и транспортных дизелей является обеспечение оптимальных значений коэффициента избытка воздуха, определяемого цикловой подачей и влияющего на полноту сгорания топлива. Наибольшей эффективностью при обеспечении высоких экологических показателей является управление топливоподачей, позволяющее обеспечить работу двигателя с приемлемым коэффициентом избытка воздуха и топливной экономичностью [1]. Однако, как показывает практика, качество топливных распылителей с распыляющими отверстиями, изготовленными электроискровым способом, оказывает значительное влияние на процесс смесеобразования.

Развитие средств регистрации изображений на базе быстродействующих цифровых ССD камер с передачей изображения в управляющую ЭВМ, позволяет разрабатывать комплексы контроля пространственно-временных параметров топливных струй из распыляющих форсунок. В ЭВМ возможно применение всего математического аппарата обработки изображений струй для выявления оптических неоднородностей, включая линейную и нелинейную фильтрации на основе преобразований Фурье, Адамара и др., контрастирование изображения, выделение гра-