

тело (воздух и остатки продуктов сгорания), что позволяет определить резервы повышения индикаторного КПД и экономичность двигателя.

3. Определены значения термического КПД двигателя с карбюраторной системой питания и системой НВТ по нагрузочной характеристике при частоте вращения коленчатого вала  $n=3000 \text{ мин}^{-1}$ .

4. Термический КПД двигателя с ИЗ и НВТ на минимальных нагрузках ( $\eta_t=47,1 \%$  при  $P_e=0,1 \text{ МПа}$ ) в 1,92 раза выше, чем у двигателя с карбюратором ( $\eta_t=25 \%$ ). С повышением нагрузки до  $P_e=0,45 \text{ МПа}$   $\eta_t$  двигателя с НВТ ( $\eta_t=47 \%$ ) выше в 1,42 раза по сравнению с  $\eta_t$  двигателя, работающего на карбюраторе ( $\eta_t=34 \%$ ).

5. Результаты исследования показали, что максимальное значение  $\eta_t$  ДВС с НВТ составляет 51% при  $P_e=0,29 \text{ МПа}$ , а значения  $\eta_t$  при этой нагрузке составляет 44,2%.

6. Повышение  $\eta_i$  и  $\eta_t$  двигателя с НВТ получено за счет: повышения степени сжатия, исключения потерь топлива при продувке, повышения коэффициента избытка воздуха, снижения коэффициента остаточных газов.

7. Для повышения  $\eta_t$  ДВС с любой системой питания необходимо уменьшать продолжительность процесса сгорания, снижать тепловые потери в процессах сжатия и расширения.

### Список литературы:

1. Мелькумов Т.М. Теория быстроходного двигателя с самовоспламенением. – М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1953. – 407 с.
2. Индикаторная диаграмма, динамика тепловыделения и рабочий цикл быстроходного поршневого двигателя / Б.С. Стечкин, К.И. Генкин, В.С. Золотаревский, И.В. Скородинский. – М.: Издательство академии наук СССР, 1960. – 199 с.
3. Пат. 60614А України, МКІ F02В 17/00. Двигун внутрішнього згорання / В.А. Корогодський, С.В. Обозний (UA). – №2003010308; Заявл. 14.01.2003; Опубл. 15.10.2003 // Річний показник за 2003 р. до офіційного бюлетеня «Промислова власність». – Ч.І. – Т.І. – Бюл. №10. – 4 с.
4. Єроценков С.А., Корогодський В.А. Щодо індикаторного ККД двигунів внутрішнього згорання. // Тез. доп. наук.-техн. конф. каф. акад. та спеціалістів залізнич. трансп. за міжнар. участю (17–19 квітня 2007 р.). – Харків: УкрДАЗТ, 2007. – с. 23.
5. Єроценков С.А., Корогодський В.А., Василенко О.В. Аналіз економічних і екологічних показателів двохтактного двигателя ДН–4М с карбюратором и непосредственным впрыском топлива // Двигатели внутреннего сгорания. – 2007. – №1. – С. 70–76.
6. И.В. Антонов Методика экспериментального исследования процессов газообмена в двухтактном двигателе // Двигатели внутреннего сгорания. – 1997. – Вып.56–57. – С. 82–86.
7. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике. – М.: Машиностроение, 1969. – 374 с.
8. Корогодський В.А., Василенко О.В. Определение показателей сгорания по индикаторным диаграммам двухтактного двигателя с карбюратором и непосредственным впрыском топлива // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета: Сб. науч. тр. / ХНАДУ – Харьков: ХНАДУ, 2007. – Вып. 37. – С. 60–67.
9. Теплотехника / А.Н. Алабовский, С.М. Константинов, И.А. Недужий. – К.: Вища шк. 1986. – 255 с.

УДК 621.43

**А.А. Прохоренко, канд. техн. наук, И.Д. Васильченко, канд. техн. наук,  
Д.В. Мешков, инж.**

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ТЕЛЕГРАФНОГО УРАВНЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА АККУМУЛЯТОРНОЙ СИСТЕМОЙ CR

### Введение

Аккумуляторные системы высокого давления

Common-Rail (CR), наряду с насос-форсунками с электромагнитным управлением, являются наиболее

современной дизельной топливной аппаратурой [1].

При этом сложные, зависящие от множества конструктивных факторов и свойств топлива процессы, происходящие в системе CR во время работы, настолько затрудняют проектирование и доводку таких систем, что они становятся невозможными без проведения расчетных исследований с использованием математического моделирования.

Создание математических моделей систем впрыскивания CR особых трудностей не вызывает, так как процессы, происходящие в ней, легко и полно описываются известными уравнениями математической физики. В частности, движение топлива в линии высокого давления (трубопроводе и каналах форсунки) математически описывается системой дифференциальных уравнений движения и неразрывности, которые сводятся к гиперболическому уравнению в частных производных, называемому «телеграфным» [2, 3]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{2k}{a^2} \frac{\partial u}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

Здесь  $u$  – скорость движения топлива,  $x$  – координата по длине трубопровода (канала),  $t$  – время,  $a$  – скорость распространения волны давления в топливе (скорость звука),  $k$  – фактор гидравлического сопротивления.

В математических моделях уравнение (1) дополняется дифференциальными уравнениями граничных условий – баланса сил, действующих на подвижные части форсунки, объемного баланса топлива в ее полостях.

Решение указанного уравнения с учетом граничных условий (задача Коши) может быть выполнено различными методами, среди которых основными, широко признанными в практике двигателестроения, являются:

- а) метод Даламбера с учетом гидродинамического трения [3];
- б) метод характеристик [2].

Наиболее полно методы решений охарактеризованы в работе [4].

Выбор метода решения уравнения (1) является спорным вопросом у исследователей, работающих в области изучения и проектирования топливной аппаратуры дизеля. Так, например, в работе [5] необоснованно критикуется применение решения телеграфного уравнения методом Даламбера, а самими авторами предлагается использование метода характеристик, хоть и усовершенствованного.

Учитывая изложенное, целью настоящей статьи является сравнение перечисленных выше методов решения телеграфного уравнения путем определения влияния метода на результаты расчета процессов при работе топливной аппаратуры CR.

#### Математическая модель системы CR

Математическая модель системы CR, которая использовалась для проведения данного исследования, разработана на кафедре ДВС НТУ «ХПИ» и реализована в среде MATLAB/Simulink. Описание модели приведено в [6]. Для проведения анализа путем численного эксперимента модель дополнена блоком, в котором реализован алгоритм метода характеристик.

#### Решение методом Даламбера

Решение уравнения (1) в форме Даламбера представляется в виде суммы двух волн давления – прямой  $F$  и обратной (отраженной)  $W$ . Тогда давление и скорость в любой момент времени в любой точке системы [3]:

$$p = p_0 + F \left( t - \frac{x}{a} \right) e^{-kt_1} - W \left( t + \frac{x}{a} \right) e^{-kt_2},$$

$$u = u_0 + \frac{1}{a\rho} \left[ F \left( t - \frac{x}{a} \right) e^{-kt_1} + W \left( t + \frac{x}{a} \right) e^{-kt_2} \right].$$

Здесь  $p_0$  и  $u_0$  – начальные условия (как правило,  $p_0 = p_2$  – давление топлива в аккумуляторе,  $u_0 = 0$  м/с).

Применительно к расчету системы CR с помо-

щью указанных уравнений, определяются значения скорости потока в сечениях (рис. 1):

$$u_I = \frac{1}{\rho a} \left[ F_I(t) + W_I \left( t + \frac{l}{a} \right) e^{-kt_2} \right] - \text{перед карма-}$$

ном распылителя;

$$u_{II} = \frac{1}{\rho a} \left[ F_{II} \left( t - \frac{L}{a} \right) e^{-kt_1} + W_{II}(t) \right] - \text{перед аккумуля-}$$

лятором;

$$u_{III} = \frac{1}{\rho a} \left[ F_{III}(t) + W_{III} \left( t + \frac{l_1}{a} \right) e^{-kt_2} \right] - \text{перед поло-}$$

стью мультипликатора запираания,

а также значения прямых и обратных волн в месте разветвления канала в форсунке, исходя из:

а) баланса расходов, что при одинаковых диаметрах разветвляющихся каналов сводится к сумме линейных скоростей потоков,  $u_{II} = u_I + u_{III}$ :

$$F_{II}(t) + W_{II} \left( t + \frac{L}{a} \right) e^{-k \frac{L}{a}} = F_I \left( t - \frac{l}{a} \right) e^{-k \frac{l}{a}} + W_I(t) + F_{III} \left( t - \frac{l_1}{a} \right) e^{-k \frac{l_1}{a}} + W_{III}(t),$$

б) равенства давлений в этом сечении:

$$F_{II}(t) - W_{II} \left( t + \frac{L}{a} \right) e^{-k \frac{L}{a}} = F_I \left( t - \frac{l}{a} \right) e^{-k \frac{l}{a}} - W_I(t) = F_{III} \left( t - \frac{l_1}{a} \right) e^{-k \frac{l_1}{a}} - W_{III}(t)$$

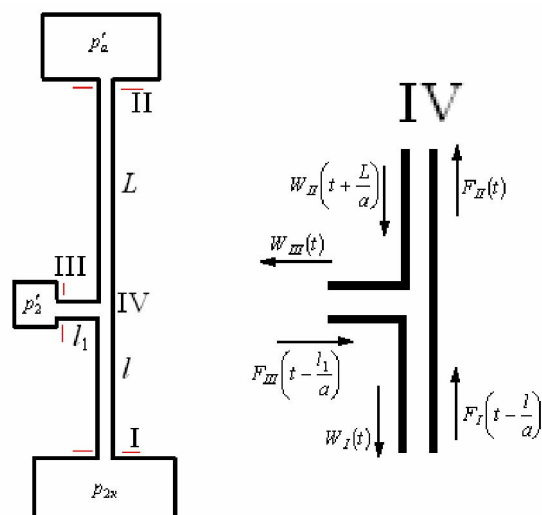


Рис. 1. Расчетная схема решения телеграфного уравнения методом Даламбера

Используя такой метод решения, можно получить хорошую сходимость расчетных и экспериментальных данных [6].

Следует отметить, что некоторое влияние на интегральные результаты расчета оказывает метод численного решения дифференциальных уравнений и шаг их интегрирования. Результаты исследования по влиянию этих факторов приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Влияние метода интегрирования на результаты расчета

Метод интегрирования	Рунге-Кутга 4 порядка	Эйлера с полушагом	Эйлера
$p_{c \max}$ , МПа	113,8	113,8	113,8
$V_{c2}$ , мм <sup>3</sup> /цикл	168,3	168,3	167,6
Время счета	8 с	6 с	4 с

Таблица 2. Влияние шага интегрирования на результаты расчета

Шаг интегрирования	0,1 мкс	0,5 мкс	1 мкс
$p_{c \max}$ , МПа	113,8	113,8	113,8
$V_{c2}$ , мм <sup>3</sup> /цикл	167,7	167,9	168,3
Время счета	72 с	12 с	6 с

Исследование проведено путем решения тестовой задачи моделирования работы системы Common Rail, разработанной в КП «ХКБД» (г. Харьков). Основные конструктивные параметры системы приведены в [4]. Заданное давление в аккумуляторе 143 МПа, продолжительность управляющего импульса

на электромагните составляет 2 мс. Некоторые результаты моделирования приведены на рис. 2. (использовано решение телеграфного уравнения методом Даламбера). Расчетная величина цикловой подачи составила 168,2 мм<sup>3</sup>/цикл.

Как видно из табл. 1 и 2, максимальная по-

грешность определения цикловой подачи при варьировании шага и метода интегрирования составила 0,7 мм<sup>3</sup>/цикл (или 0,4 %). Исходя из полученных результатов, в дальнейшем для проведения расчетов принят шаг интегрирования 1 мкс, метод интегрирования – Эйлера с половинным шагом.

**Решение методом характеристик**

Решение уравнения (1) методом характеристик основано на преобразовании этого уравнения в систему дифференциальных уравнений в полных дифференциалах с их последующим решением числен-

ным разностным методом [2]. Исходя из этого, скорость  $u_s$  и давление  $p_s$  в любой точке системы в любой момент времени определяются уравнением:

$$p_s = \frac{1}{2} [(u_m - u_q) \cdot a \cdot \rho + p_m + p_q];$$

$$u_s = \frac{1}{2 + 4 \cdot k \cdot \Delta t} \left( u_m + u_q + \frac{p_m - p_q}{a \cdot \rho} \right),$$

где  $p_m, u_m$  – давление и скорость топлива на предыдущем шаге в предыдущем сечении;  $p_q, u_q$  – давление и скорость топлива на предыдущем шаге в следующем сечении.

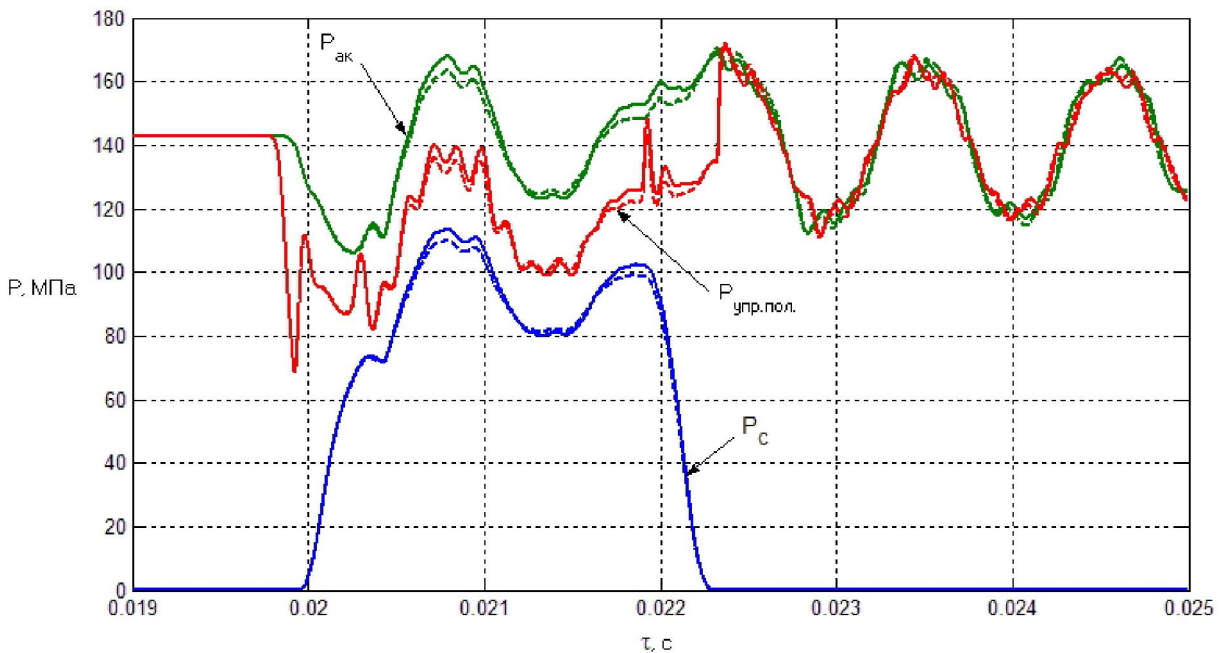


Рис. 2. Результаты моделирования: решение методом Даламбера (—), решение методом характеристик (----)

Параметры потока в разветвлении каналов в форсунке рассчитывается на основе определенных граничных условий в этом сечении исходя из равенства давлений и равенства суммы скоростей при одинаковых диаметрах каналов (см. рис. 1). Тогда:

$$p_s = p_m - 2 \cdot a \cdot \rho \cdot k \cdot u_{sII} \cdot \Delta t - a \cdot \rho \cdot (u_{sII} - u_{mII});$$

$$u_{sII} = \frac{1}{3 + 8 \cdot k \cdot \Delta t} \left[ (2 \cdot u_{mII} + u_{qII} + u_{qIII}) + \frac{2 \cdot p_{mII} - p_{qII} - p_{qIII}}{a \cdot \rho} \right];$$

$$u_{sI} = \frac{1}{1 + 2 \cdot k \cdot \Delta t} \left[ u_{qI} + \frac{p_{sII} - p_{qI}}{a \cdot \rho} \right];$$

$$u_{sIII} = \frac{1}{1 + 2 \cdot k \cdot \Delta t} \left[ u_{qIII} + \frac{p_s - p_{qIII}}{a \cdot \rho} \right].$$

Некоторые результаты расчета тестовой задачи, условия которой описаны выше с использованием такого решения, приведены на рис. 2. Как видно из рисунка, значительного отличия в результатах моделирования при изменении метода решения основного

уравнения не наблюдается. Изменение величины расчетной цикловой подачи – 0,84 % ( $V_c = 166,8 \text{ мм}^3/\text{цикл}$ ).

### Сравнительные расчетные исследования

Для более детального изучения влияния метода решения телеграфного уравнения на результаты моделирования работы системы Common Rail приведены расчетные исследования с изменением следующих параметров:

- $p_{ак}$  – давление топлива в аккумуляторе;
- $L_{тр}$  – длина трубопровода высокого давления;
- $\nu$  – кинематическая вязкость топлива;
- $d_{тр}$  – внутренний диаметр трубопровода высокого давления.

### Давление топлива в аккумуляторе

Влияние на результаты расчета метода решения в зависимости от давления топлива в аккумуляторе  $p_{ак}$  приведены в табл. 3 и на рис. 3. Время счета при переходе на решение методом характеристик увеличивается в 5...6 раз. В остальном же, как видно из таблицы и рисунков, разница результатов не превышает 1 % по величине цикловой подачи.

Как видно из рисунка, расчет по методу Даламбера дает более высокие значения давлений впрыскивания по сравнению с методом характеристик. Однако, относительное расхождение по  $p_{сmax}$  не превышает 1,5 %.

Таблица 3. Влияние метода решения и давления в аккумуляторе  $p_{ак}$

$p_{ак}$ , МПа	60		100		140	
Метод решения	Даламбер	Характеристик	Даламбер	Характеристик	Даламбер	Характеристик
$p_{сmax}$ , МПа	43,3	42,2	76,5	74	111,1	107,4
$V_c$ , мм <sup>3</sup> /цикл	92,1	91,6	131,3	130,6	165,3	163,9

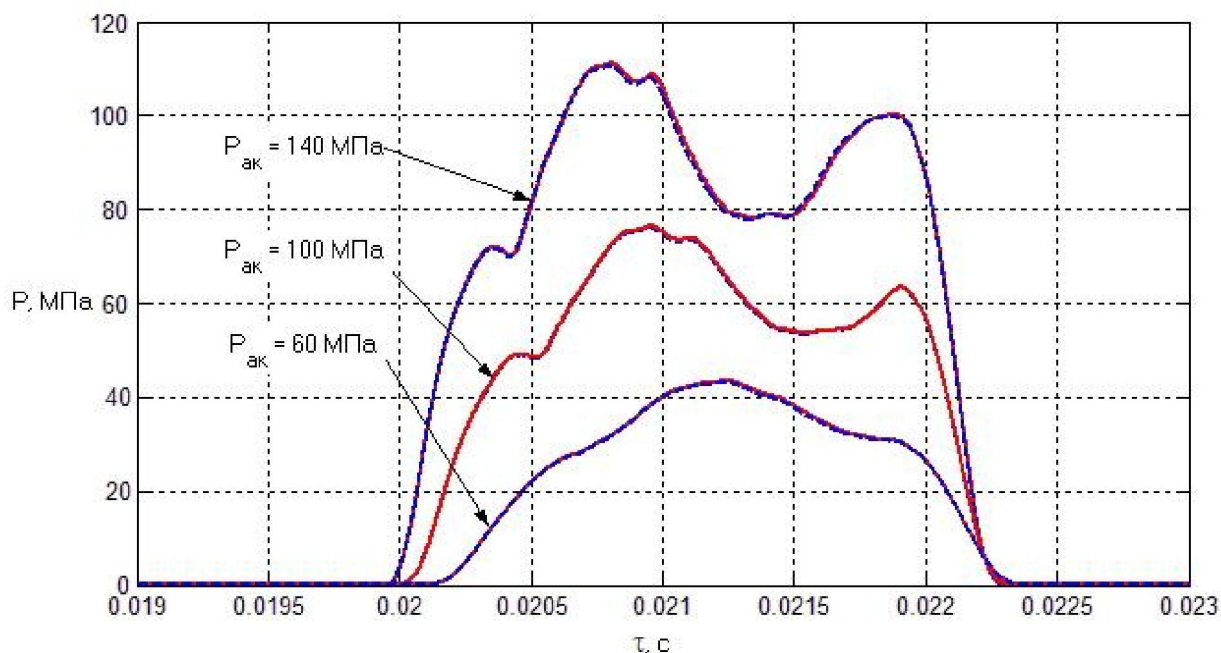


Рис. 3. Влияние метода решения и давления в аккумуляторе  $p_{ак}$  на давление впрыскивания: решение методом Даламбера (—), решение методом характеристик (---)

Длина ТВД

Влияние на результаты расчета метода решения в зависимости от  $L_{mp}$  приведены в табл. 4 и на рис. 4. Наибольшая разница в результатах расчета

(около 1,5 %) имеет место при расчете системы с длинным ТВД (3,2 м), что не характерно для конструкций систем Common Rail.

Таблица 4. Влияние метода решения и длины ТВД

$L_{mp}$ , м	0,032		0,32		3,2	
Метод решения	Даламбер	Характеристик	Даламбер	Характеристик	Даламбер	Характеристик
$p_{cmax}$ , МПа	102,8	101,7	111,1	107,4	68,9	68,4
$V_c$ , мм <sup>3</sup> /цикл	167,2	166,8	165,3	163,9	143,6	141,5

Вязкость топлива

Величина кинематической вязкости топлива оказывает влияние на значение фактора гидравлического сопротивления  $k$ . При расчете по методу Даламбера фактор  $k$  принимается постоянным и опре-

деляется опосредованно по длине канала высокого давления и времени. Расчет по методу характеристик позволяет определять местное значение  $k$ , исходя из рассчитанной в определенном сечении скорости потока.

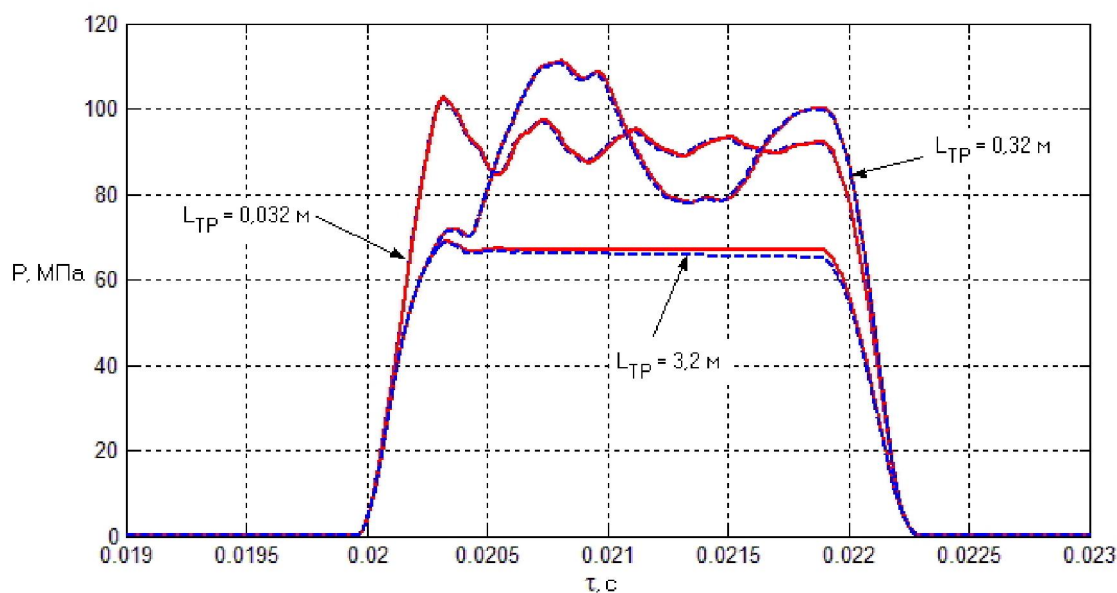


Рис. 4. Влияние метода решения и длины ТВД  $L$  на давление впрыскивания: решение методом Даламбера (—), решение методом характеристик (----)

При проведении исследования для выполнения расчета по методу Даламбера значение  $k_{cp}$  определялось путем усреднения местных  $k$ , полученных методом характеристик.

Значение  $k_{cp}$ , определенное через усреднение по длине трубопровода и времени по формулам, приведенным в [2], для топлив с кинематической вязкостью от 3 до  $40 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с лежит в пределах  $k_{cp} =$

$40 \dots 130$  с<sup>-1</sup> (при принятом диаметре трубопровода высокого давления (ТВД)  $d_{mp} = 2$  мм). Следует отметить, что местные и средние значения  $k$  и  $k_{cp}$ , вычисленные по зависимостям, приведенным в [4] в 1,5...2,5 раза меньше.

Влияние на результаты расчета метода решения телеграфного уравнения в зависимости от значения  $v$  приведены в табл. 5 и на рис. 5.

Таблица 5. Влияние метода решения и вязкости топлива

$\nu$ , м <sup>2</sup> /с	0		$6 \cdot 10^{-6}$		$30 \cdot 10^{-6}$	
$k_{cp}$ , с <sup>-1</sup>	0	var	60	var	120	var
Метод решения	Даламбер	Характеристик	Даламбер	Характеристик	Даламбер	Характеристик
$p_{cmax}$ , МПа	112,1	111,6	111,1	107,4	109,6	105,6
$B_c$ , мм <sup>3</sup> /цикл	165,7	165,6	165,3	163,9	164,7	163,5

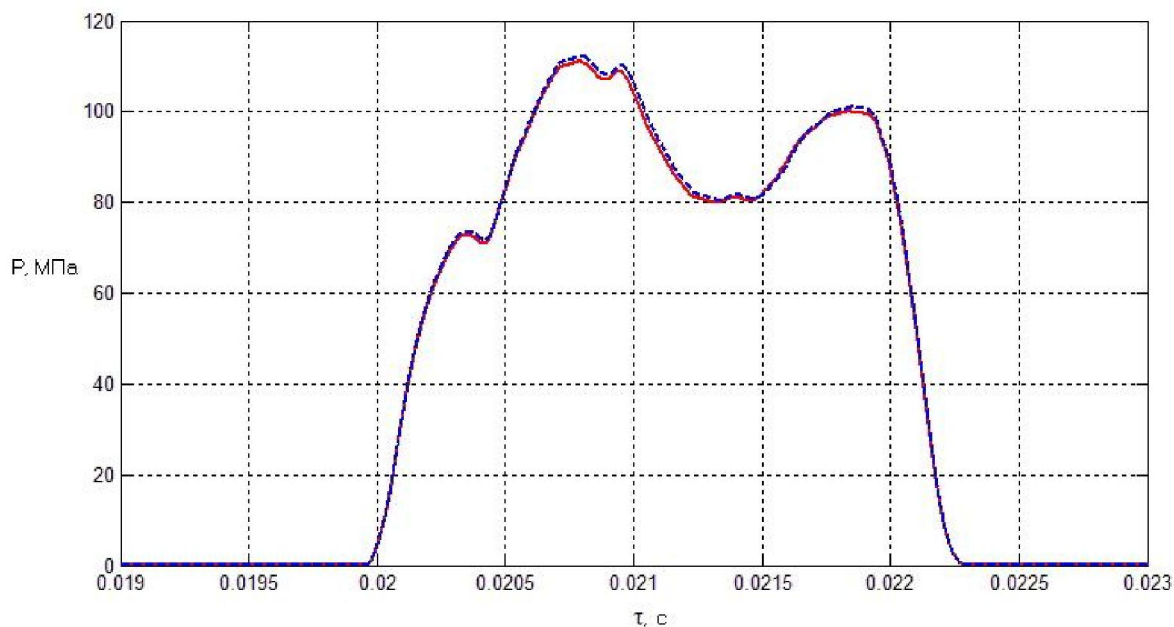


Рис. 5. Влияние метода решения и вязкости топлива  $\nu$  на давление впрыскивания: решение методом Даламбера (—), решение методом характеристик (-----)

Как видно из рисунка и таблицы, при пренебрежении вязкостью топлива ( $\nu=0$ ,  $k_{cp}=0$ ) результаты расчетов с использованием обоих методов практически совпадают. Наибольшая разница в результатах имеет место при расчете системы с подачей вязкого топлива ( $\nu = 30 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $k_{cp} = 120$  с<sup>-1</sup>) и составляет величину 1,2 мм<sup>3</sup>/цикл (0,75 %) по величине цикловой подачи. Учитывая, что вязкость применяемых в автотракторных дизелях топлив находится в пределах  $2 \dots 6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с (соответствует  $k_{cp} = 40 \dots 75$  с<sup>-1</sup>), можно считать, что результаты решения методом характеристик не имеют существенного отличия от результатов, полученных методом Даламбера.

#### Диаметр трубопровода высокого давления

Диаметр трубопровода высокого давления (ТВД) также оказывает влияние на значение фактора гидравлического сопротивления  $k$ . При проведении

исследования определение значения  $k_{cp}$  для выполнения расчета по методу Даламбера производилось также, как и в предыдущем исследовании. Влияние на результаты расчета метода решения телеграфного уравнения в зависимости от величины  $d_{mp}$  приведены в табл. 6 и на рис. 6.

Как видно из приведенных данных, при уменьшении  $d_{mp}$  имеет место увеличение расхождения результатов моделирования в зависимости от применяемого метода решения. Так, при расчете системы с  $d_{mp} = 1,5$  мм ( $k_{cp} = 180$  с<sup>-1</sup>) расхождение в определении цикловой подачи составляет величину 3,7 мм<sup>3</sup>/цикл или 2,4 % (расхождение в определении  $p_{cmax}$  8,8 МПа или 8,6 %). При увеличении исследуемого параметра рассогласованность резко убывает (при  $d_{mp} = 2$  мм – до 3,5 % по  $p_{cmax}$ , а при  $d_{mp} = 2,5$  мм – до 1,5 %).

Таблица 6. Влияние метода решения и диаметра ТВД

$d_{тр}$ , м	0,0015		0,002		0,0025	
$K_{ср}$ , $c^{-1}$	180	var	60	var	15	var
Метод решения	Даламбер	Характер.	Даламбер	Характер.	Даламбер	Характер.
$p_{max}$ , МПа	111,3	102,5	111,1	107,4	107,2	105,6
$V_c$ , $mm^3/цикл$	160,9	157,2	165,3	163,9	166,9	166,4

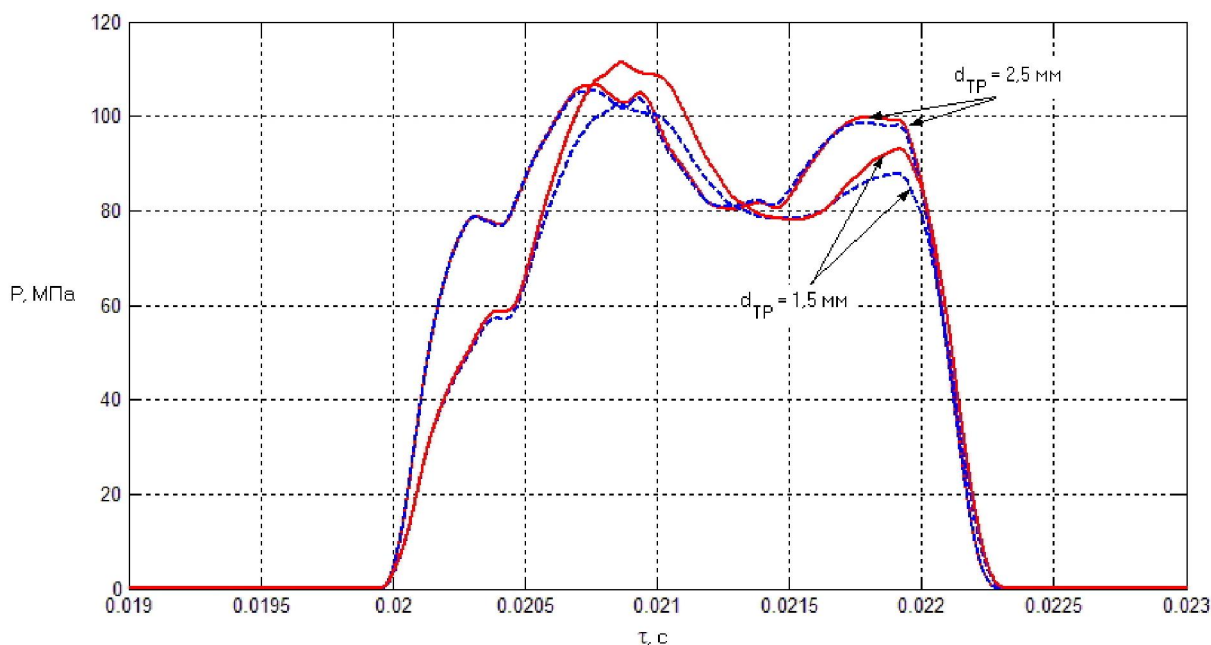


Рис. 6. Влияние метода решения и диаметра ТВД  $d_{тр}$  на давление впрыскивания: решение методом Даламбера (—), решение методом характеристик (----)

Учитывая, что ТВД, которые применяются в системах CR, имеют (или, по крайней мере, должны иметь) внутренний диаметр более 2 мм – также можно считать, что изменение метода решения не проявляет существенных отличий в результатах расчета.

### Выводы

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Рациональным методом интегрирования дифференциальных уравнений граничных условий при моделировании системы Common Rail является метод Эйлера с половинным шагом и основным шагом интегрирования равным 1 мкс.

2. Наиболее значительное расхождение в результатах расчета при использовании при решении

телеграфного уравнения, описывающего движение топлива, метода Даламбера и метода характеристик имеет место при моделировании систем CR с ТВД, имеющими малый внутренний диаметр ( $< 2$  мм) и использующих вязкое топливо.

3. Поскольку в автотракторных дизелях применяется маловязкое топливо, а системы высокого давления, как правило, имеют короткие трубопроводы относительно большого внутреннего диаметра, метод решения не оказывает значительного влияния на результаты моделирования процессов в системе CR.

4. Применение метода характеристик значительно (до 5 раз) увеличивает время расчета на ЭВМ.

### Список литературы:

1. Robert Bosch GmbH, Dieselmotor-Management, 3.



*vollständige überarbeitete und erweiterte Auflage, 2002. – S. 443.* 2. Фомин Ю.Я. Гидродинамический метод расчета топливных систем дизелей с использованием ЭЦВМ – М.: Машиностроение, 1973. – 144 с. 3. Кузнецов Т.Ф., Колесник И.К., Василенко Г.Л. Тория и метод расчета на ЭВМ процесса впрыска вязкого сжимаемого топлива в цилиндр дизеля // Сб. «Двигатели внутреннего сгорания». – Харьков: изд-во ХГУ, 1968. – Вып. 7. – С.105-117. 4. Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: Учебник для вузов. – М.: Легион-Автодата, 2004. – 344 с. 5. Врублевский

А.Н., Григорьев А.Л., Грицюк А.В., Денисов А.В., Щербаков Г.А. Особенности математического моделирования гидромеханических процессов электрогидравлической форсунки // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – №1. – С.44-52. 6. Марченко А.П., Прохоренко А.А., Мешков Д.В. Математическое моделирование процессов в электрогидравлической форсунке системы Common Rail в среде MATLAB/Simulink // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – №1. – С.98-101.

УДК 621.43

**В.А. Звонов, д-р техн. наук, М.П. Гиринович, канд. техн. наук**

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА В УСЛОВИЯХ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЯ

Наибольший экологический ущерб от выбросов вредных веществ, образующихся в камере сгорания дизеля, приходится на оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), основную массу которых составляет монооксид азота ( $\text{NO}$ ). В зависимости от процессов, приводящих к образованию  $\text{NO}$ , выделяют следующие механизмы:

- «термический»;
- «быстрый»;
- « $\text{N}_2\text{O}$ »;
- «топливный».

Образование  $\text{NO}$  по «термическому» механизму происходит в зоне продуктов сгорания при высокой температуре в результате окисления атмосферного азота свободным кислородом.

«Быстрые»  $\text{NO}$  образуются непосредственно в зоне горения углеводородных топлив в результате связывания молекул азота углеводородными радикалами.

Формирование  $\text{NO}$  по механизму « $\text{N}_2\text{O}$ » происходит через предварительное образование закиси азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ).

«Топливные»  $\text{NO}$  образуются в процессе горения в результате частичного окисления азотсодер-

жащих соединений топлива. В дизельном топливе этих компонентов крайне мало (не более 0,007–0,01 %), и они не оказывают существенного влияния на процесс образования  $\text{NO}$  [1]. В расчетной части работы данный механизм не рассматривался, поскольку его значимостью можно пренебречь.

В условиях, характерных для образования оксидов азота в камере сгорания современного дизеля ( $\alpha \sim 1$ ,  $T = 2400\text{--}2800$  К,  $\phi = 2\text{--}4$  мс [ $\phi \approx 10\text{--}25$  °ПКВ при  $n = 1000$  мин<sup>-1</sup>]), основная масса  $\text{NO}$  формируется по «термическому» механизму Зельдовича [2]. Поэтому при разработке рабочих процессов перспективных дизелей стремятся уменьшить максимальную температуру в зоне продуктов сгорания. Это может привести к увеличению вклада других механизмов образования  $\text{NO}$ , поскольку воздействие температуры на них может быть не столь значимым.

Для оценки вклада «быстрого» и « $\text{N}_2\text{O}$ » механизмов образования  $\text{NO}$  в условиях камеры сгорания перспективного двигателя необходимо проведение детального анализа.