

расчет будет проводиться не по средней скважине, а по каждой скважине отдельно, с совмещением результатов расчетов каждой подмодели скважины (группы скважин) при помощи уравнения материального баланса. Текущие прототипы на базе Mathcad не позволяют добиться необходимой степени гибкости модели, а ее общие размеры делают ее полное восприятие невозможным или очень трудным для большинства студентов. Поэтому дальнейшая разработка ведется на платформе .NET Framework на языке программирования C#.

Вывод. По результатам сравнения с работой программы GasDrive установлено, что общая модель расчета показателей разработки газоконденсатных месторождений дала аналогичные результаты (что является следствием использования схожего алгоритма) и наследует все преимущества данной программы.

Список литературы: 1. *Окульшин О.И., Бойко В.С., Дорошенко В.М., Зарубин Ю.О.* Технологии добычи, хранения и транспорта нефти и газа / Учебное пособие. – Ивано-Франковск: Факел, – 2003 – 434с. 2. Инструкция по комплексному исследованию газовых и газоконденсатных скважин. / Под ред. *Г.А. Зотова, З.С. Алиева.* – Москва: Недра, – 1980 – 301 с.

Bibliography (transliterated): 1. Okul'shin, O. I., et al. *Technologii dobychi, hranenija i transporta nefti i gaza. Uchebnoe posobie.* Ivano-Frankivsk: Fakel, 2003. Print. 2. *Zotov, G. A., and Z. S. Aliev.* *Instrukcija po kompleksnomu issledovaniju gazovyh i gazocondensatnyh skvazhin.* Moscow: Nedra, 1980. Print.

Поступила (received) 06.10.2014

УДК 621.43

А.М. ЛЕВТЕРОВ, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ИПМаш НАНУ,
Харьков;

Л.И. ЛЕВТЕРОВА, вед. инженер, ИПМаш НАНУ, Харьков

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭМИССИИ САЖИ И ОКСИДОВ АЗОТА В ДИЗЕЛЕ С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ВПРЫСКОМ

Предлагается методология прогнозирования эмиссии сажи и оксидов азота с отработавшими газами дизеля с непосредственным впрыскиванием. Исследования проводились в термодинамической структуре полного цикла дизеля с 2-х зонной моделью сгорания и опираются на концептуальные положения лазерной диагностики процесса сгорания в дизеле, химической кинетики сгорания углеводородных топлив, сформировавшиеся в последние годы, и экспериментальные исследования. Численные результаты получены для режима максимального крутящего момента конкретного двигателя с учетом оценки влияния на эмиссию сажи и оксидов азота начала впрыскивания топлива, что немаловажно для возможного исследования альтернативных топлив.

Ключевые слова: моделирование, сажа, оксиды азота, дизель, токсичность, рабочий процесс.

© А. М. Левтеров, А. И. Левтерова, 2014

Введение. В ряду поршневых двигателей, работающих по *циклу Дизеля*, особое место занимают дизели с непосредственным впрыском, обладающие большим потенциалом. К ним в последнее время обращены многие исследования, направленные на анализ процессов, связанных с преобразованием энергии и образованием токсических составляющих в отработавших газах двигателя. Для дизеля удельный выброс в атмосферу CO_2 , CH и CO традиционно ниже, чем для двигателя с искровым зажиганием, но эмиссия твердых частиц, в том числе сажи, и оксидов азота значительно выше. Требования следования стандартам на эмиссию вредных составляющих в отработавших газах понуждают к новым исследованиям в понимании и прогнозировании их возникновения и методам снижения. Интерпретировать причинно-следственные связи по результатам исследований предварительных расчетов и эксперимента, понять качественное взаимовлияние параметров двигателя в целом и параметров, сопровождающих впрыск и сгорание топлива на рабочие характеристики дизеля без вмешательства математического моделирования трудно, так как именно с помощью модели можно осуществить стратегию оптимального выбора. Исследования будут полноценнее при использовании математической модели полного цикла дизеля в противовес большинству исследований, сосредоточенных только на процессе сгорания, например [1, 2].

Методология прогнозирования эмиссии сажи и оксидов азота. На базе ранее заявленных разработок [3, 4] и публикаций других авторов проведены численные исследования рабочего цикла дизеля с непосредственным впрыском, касающиеся прогнозирования эмиссии сажи и оксидов азота. Процесс образования и количественное определение эмиссии сажи, причём не только в двигателях, – это активная область исследований в виду отрицательного влияния сажи на окружающую среду и способность сорбировать на своей поверхности канцерогенные вещества. Не менее вредны оксиды азота, которые при взаимодействии с окружающей средой приводят к смогу, кислотным дождям, непосредственно влияют на здоровье человека.

Исследования проводились в термодинамической структуре полного цикла дизеля [3] с *двух зонной моделью сгорания*. Состояние рабочей смеси в камере сгорания на каждом шаге изменения процесса представлено двумя зонами: свежего заряда (испаренное в воздухе топливо) и продуктов сгорания. В пределах каждой зоны по мере изменения текущего объема цилиндра определяются температура, состав смеси, текущие значения удельного объема и термодинамических функций смеси. Давление в цилиндре постулируется одинаковым по всему объему, состав продуктов сгорания – равновесный. Энергоперенос в системе осуществляется в форме изменения энтальпий или внутренней энергии смеси, теплового потока в стенки цилиндра каждой из зон и совершения полезной работы.

Выгорание топливовоздушной смеси по мере продвижения бесконечно тонкого фронта пламени моделируется *зависимостью Вибе* [5], которая за последние пять десятков лет, судя по публикациям в разных странах, используется наиболее широко

$$x = 1 - \exp[-a \cdot ((\varphi - \varphi_0) / \Delta\varphi)^{m+1}],$$

где φ , φ_0 , $\Delta\varphi$ – текущий угол поворота коленчатого вала, угол начала сгорания, продолжительность сгорания соответственно; a и m – константы, устанавливаемые на основе экспериментальных данных для каждого типа двигателя.

Процесс сгорания в дизеле – комбинация сложных химических и физических процессов – начинается с впрыскивания определенного количества топлива в камеру сгорания под высоким давлением в конце такта сжатия:

$$m_{inj} = C_d \cdot A \sqrt{2\rho_f \cdot \Delta p} \cdot (\Delta\varphi_{inj} / 360n) \cdot z,$$

где C_d – характеристика сопла, коэффициент разряжения; A – площадь поперечного сечения сопла; Δp – избыточное давление; z – количество сопел; $\Delta\varphi_{inj}$ – продолжительность впрыскивания; n – частота вращения коленчатого вала двигателя; ρ_f – плотность топлива.

В дифференциальной форме количество поступающего в цилиндр топлива на каждом шаге интегрирования для одного сопла распылителя запишется как

$$\dot{m}_{inj} = C_d \cdot A \sqrt{2\rho_f \cdot \Delta p}.$$

Струя жидкого топлива массой m_{inj} быстро превращается в аэрозоль, смешиваясь с горячим предварительно сжатым воздухом. Температура этой смеси растет вследствие продолжающегося движения поршня к верхней мертвой точке и по истечении определенного времени τ_{id} происходит ее самовоспламенение, зависящее от температуры и давления в цилиндре, концентрации воздуха, топлива и их состава. Для углеводородовоздушных смесей время задержки воспламенения экспоненциально зависит от обратной температуры, что соответствует известной зависимости Аррениуса в виде [6]

$$\tau_{id} = A \cdot p^{-n} \exp(E_a / RT),$$

где A и n – экспериментально определяемые константы; E_a – условная энергия активации реакции воспламенения топлива.

Для дизельного топлива чаще всего используется зависимость

$$\tau_{id} = 3 / 45 \cdot p^{-1,02} \exp(2100 / T).$$

Кроме того, самовоспламеняемость топлива характеризуется *цетановым числом* и может происходить одновременно в разных локальных областях камеры сгорания.

Сгорание топливовоздушной смеси сопровождается генерацией твердых частиц, в частности сажи, оксидов азота, несгоревших углеводородов, оксидов и диоксидов углерода, количественная эмиссия которых зависит от качества и особенностей процесса сгорания.

Процессы выделения сажи и оксидов азота при сгорании топлива в дизельных двигателях в значительной степени изучены. Концептуальная модель образования (уточняемая и развивающаяся), обоснованная лазерной диагностикой на *оптическом дизеле*, экспериментами и химической кинетикой

различных марок дизельного топлива, изложена в [7, 8]. Она дает представление о структуре развития пламени и начальное понимание процесса сгорания, происходящего в дизельном двигателе и, что немаловажно, позволяет оценить правильность моделирования (рис. 1).

Проникновение топлива от момента впрыскивания инжектором в камеру сгорания (КС) и до полного его выгорания длится 2 – 3 миллисекунды, за это время происходит определенная последовательность изменений температуры, выделения тепла и образования продуктов сгорания, сопровождающих это проникновение. Топливо попадает в КС с невысокой температурой, около 350 К, и уже по достижении струей топлива длины 25 мм полностью испаряется в вовлеченном горячем воздухе. Вовлечение воздуха уменьшает соотношение топливо/воздух, повышает температуру смеси, и при температуре 700 К начинаются химические реакции, которые приводят к образованию H_2O_2 , а дальнейший рост температуры к его распаду до OH и воспламенению. Этот процесс зависит от начальной температуры топлива, а также количества и температуры вовлеченного воздуха. Образовавшаяся топливовоздушная смесь однородна и богата топливом, представляет собой регион, окруженный оболочкой диффузного пламени, в котором за счет теплопередачи извне (от горячего воздуха, увеличения давления и процессов в диффузной пламенной оболочке) наблюдается рост температуры до 750–850 К, и начинается бурный процесс окисления топлива доступным кислородом. Продукты реакций окисления включают в себя как продукты полного окисления – CO_2 , пары воды H_2O , так и неполного окисления – оксид углерода – CO , фрагменты топлива, частично сгоревшие углеводороды C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_3 – предшественники сажи, ее зародыши. Гомогенная богатая смесь является идеальной средой для их образования. При полном расходе кислорода местного масштаба химические реакции окисления заканчиваются, начинается интенсивное выделение тепла, растет температура до уровня 1600–1700 К.

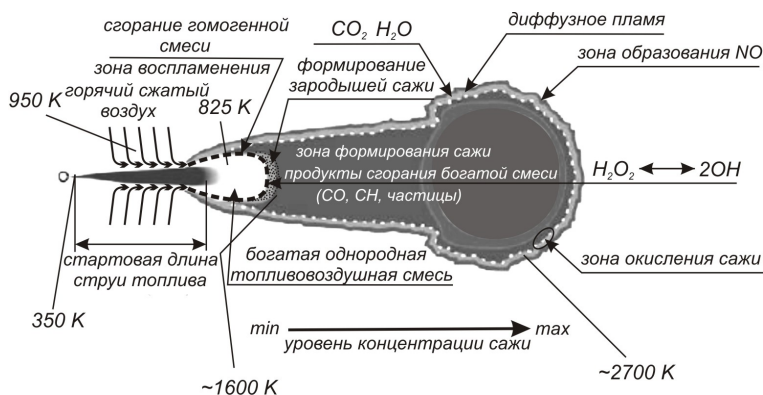


Рис. 1 – Концептуальная схема квазиустановившегося сгорания топливовоздушного аэрозоля.

Часть и продуктов сгорания, и фрагментов топлива транспортируется из внутренней зоны факела в оболочку диффузного пламени, которая характеризуется очень тонкой реакционной зоной, где происходит их дальнейшее окисление до CO_2 и H_2O , и наблюдается рост температуры до 2500 К. Таким образом, появляется среда, благоприятная для реакций образования оксидов азота NO . Внутри факела, окруженного диффузной оболочкой пламени, по всему поперечному сечению, зародыши сажи по мере продвижения вдоль факела агломерируют, происходит рост поверхности сажевых частиц, дальнейшее их укрупнение, достигающее максимальной концентрации в головке факела. То есть, происходит типичный процесс сажеобразования. Частицы сажи, попадающие во внешнюю оболочку факела, окисляются до полного исчезновения, то есть до конечных продуктов сгорания. Причем, чем выше температура, тем эффективнее окисление сажи. И таким образом, итоговая эмиссия сажи в камере сгорания составит разницу между сформировавшимся и окислившимся ее количеством.

На поверхности диффузного пламени, которое формируется по внешней поверхности факела сразу после начала гомогенного сгорания и окружает облако сажи, среди продуктов полного сгорания из азота и кислорода воздуха, поступающего в камеру сгорания, формируется термический (тепловой) монооксид азота NO , для которого высокая температура является стимулом увеличения концентрации. В периферийной зоне, окружающей горение гомогенной смеси, образование NO ограничено из-за малости температуры и концентраций атомов кислорода, основное формирование оксидов начинается при температуре не ниже 1800 К.

Таким образом, к образованию зародышей сажи приводят реакции в богатой топливом смеси, а сгорание этой смеси в высокотемпературном диффузном пламени на периферии приводит к образованию монооксидов азота.

С учетом вышеперечисленной идентификации регионов сгорания и допущений модели [3] построены модули образования сажи и оксидов азота в камере сгорания дизеля, выделенные в отдельные процедуры в общей структуре модели рабочего цикла.

Моделирование эмиссии сажи. Сложность механизма образования сажи почти исключила разработку детальных подходов моделирования для технических задач, так как это служило бы препятствием к их использованию. Моделирование сопряжено со многими трудностями, пожалуй, главная из них – это до конца не изученный процесс получения количественной концентрации и большие вычислительные затраты при детализации процесса. Для прикладного использования модели сажеобразования базируются на одноступенчатом или двухступенчатом кинетическом механизме и феноменологических упрощенных моделях [9, 10, 11], допускающих, что за короткий период времени протекания сгорания при высокой температуре полный механизм формирования и окисления сажи подчиняется закону Аррениуса. Эмпирические константы адаптируют модель образования сажи к конкретному топливу и тепловому режиму; полагается, что энергия, выделившаяся с реа-

гентами реакции образования сажи, равна энергии продуктов реакции. Фокусирование внимания на качественном аспекте образования сажи помогает облегчить понимание влияния процесса на выбор параметров двигателя. В модель рабочего цикла дизеля на первом этапе адаптирована модель *сажеобразования Hiroyasu* [9], которая опирается на очевидные факторы, влияющие на механизм сажеобразования, то есть давление, температуру, соотношение воздух/топливо. Модель Hiroyasu остается востребованной как для феноменологических моделей рабочего цикла двигателя, так и для пространственных CFD моделей уже на протяжении нескольких десятилетий [2, 12, 13, 14, 15]. Единственным ограничением модели является необходимость ее настройки с помощью эксперимента в случае изменения конфигурации рабочего объема двигателя. По этой причине в средствах проектирования двигателей модель используется редко, но продолжает широко применяться в задачах оптимизации и прогнозирования процессов в ДВС.

Образование сажи характеризуется двумя конкурирующими процессами: формирования,

$$dm_{sf} / dt = A_f \cdot m_f \cdot p^{0,5} \exp(E_f / RT)$$

и окисления,

$$dm_{so} / dt = A_o \cdot m_{sf} \cdot [O_2] \cdot p^{1,8} \exp(E_o / RT),$$

где m_f , m_{sf} , m_{so} – массы выгоревшего топлива, сформировавшейся сажи и окислившейся сажи соответственно; A_f , A_o – калибровочные константы, определяемые типом двигателя; E_f , E_o – энергия активации реакций формирования и окисления сажи; R – универсальная газовая постоянная; p , T – давление и температура в цилиндре двигателя; $[O_2]$ – мольная равновесная концентрация кислорода.

Доля каждого процесса зависит от топливной композиции, содержания кислорода, то есть соотношения топливо/воздух, температуры и давления в цилиндре и организации процесса сгорания, в том числе подачи топлива, эксплуатационной нагрузки. Итоговое уравнение образования сажи имеет вид

$$dm_{soot} / dt = dm_{sf} / dt - dm_{so} / dt,$$

а решение дифференциальных уравнений реализуется простым *методом Эйлера*.

Кроме того, при температуре 1000 К (это утверждение базируется на трудах Фостера и Казакова [16]) процесс формирования сажи заканчивается, происходит *закалка* образования, следовательно заканчивается в связи с этим и расчетный процесс формирования сажи, процесс окисления сажи продолжается до завершения расчета рабочего цикла.

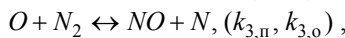
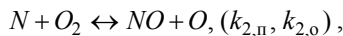
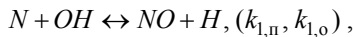
Моделирование эмиссии оксидов азота. Окислы азота (NO , NO_2 , N_2O , N_2O_2 , N_2O_3 , N_2O_4 и N_2O_5) образуются при различных условиях. В

процессах сгорания топлива в стационарных и транспортных поршневых двигателях одновременно формируются оксиды NO и NO_2 . Принятое их обозначение NO_x включает около 90 – 95 % монооксида азота NO и до 5 % диоксида азота NO_2 . Химическое образование NO при попадании отработавших газов двигателя в атмосферу быстро окисляется до NO_2 , который, участвуя в фотохимических реакциях, приводит к кислотным дождям, повреждению зеленых насаждений, смогам и непосредственно влияет на здоровье.

При моделировании образования оксидов азота основное внимание уделяется формированию в камере сгорания монооксидов азота NO . Источниками его формирования могут быть *быстрый* NO в соответствии с моделью Фенимора, *топливный* NO , образующийся благодаря молекулам азота в составе топлива, и *термический* NO , формирование которого происходит на базе азота и кислорода воздуха и рассматривается в соответствии с *расширенным механизмом Зельдовича Я. Б.*, устанавливающим независимо от состава горючей смеси, что образование

$$NO \sim \sqrt{[N_2] \cdot [O_2]},$$

где $[O_2]$ – концентрация кислорода в продуктах горения [17, 18], и что формирование монооксидов управляется химической кинетикой, но не химическим равновесием. Отмеченное отсутствие какого-либо влияния химической специфики горения на образование NO – важный аргумент в пользу термического характера окисления азота. Расширенный механизм Зельдовича базируется на 3-х основных обратимых реакциях и на условии достижения равновесия образования реагентов H , O , OH :



где $k_{i,п}$, $k_{i,о}$ – константы скоростей реакций (прямых и обратных соответственно), для которых выполняется уравнение Аррениуса, взяты из [6]:

$$k_{1,п} = 1 \cdot 10^{14}; k_{2,п} = 6,4 \cdot 10^9 \cdot T \cdot e^{(-3150/T)}; k_{3,п} = 7,6 \cdot 10^{13} \cdot e^{(-38000/T)};$$

$$k_{1,о} = 2 \cdot 10^{14} \cdot e^{(-23650/T)}; k_{2,о} = 1,5 \cdot 10^9 \cdot T \cdot e^{(-19500/T)}; k_{3,о} = 1,6 \cdot 10^{13}.$$

Уровень образования монооксида азота, прежде всего, является функцией температуры, на рис. 2 представлен характер этой зависимости. Максимального значения уровень образования NO_x достигает в диапазоне температуры между 1900 и 2000° С. Глобальная реакция образования монооксида $N_2 + O_2 \leftrightarrow 2NO$ своего равновесия достигает медленно, реакция при высокой температуре идет быстрее в прямом направлении. При движении поршня к нижней мертвой точке в результате расширения происходит быстрое охлаждение газовой смеси, обратная реакция тормозится, и полученный в результате прямой реакции оксид замораживается на определенном уровне из-за

замедлившегося достижения равновесия в образовании O , H , OH .

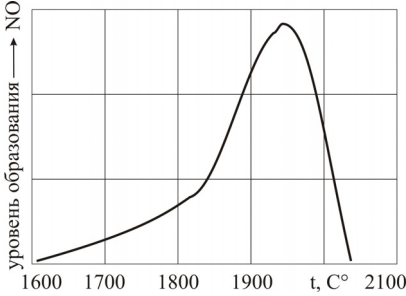


Рис. 2 – Формирование теплового оксида азота – функция температуры.

Кроме того, исследования [9] показали, что время образования основного количества оксидов азота в камере сгорания занимает от $2,2 \cdot 10^{-3}$ секунд до $6,2 \cdot 10^{-3}$ секунд, то есть 20 – 30 градусов поворота коленчатого вала двигателя, и активно происходит при температуре сгорания смеси выше 2000 К.

Очевидно, что потенциальное увеличение термического NO возможно при любой из трех возможных

стратегий развития процесса горения в цилиндре: увеличение температуры; время пребывания горючей смеси в условиях высокой температуры; концентрация доступного кислорода (O_2) в зоне сгорания, и атмосферного азота (N_2). Следовательно, любые средства, способные повлиять на эти факторы в сторону уменьшения, ведут к уменьшению образования оксидов азота.

Все особенности образования монооксидов азота в камере сгорания соответствующим образом отражены в модели формирования монооксидов азота, модели рабочего цикла дизеля и в соответствующем программном обеспечении.

Дифференциальное уравнение изменения концентраций монооксида азота, выведенное из кинетической схемы химических реакций:

$$dC_{NO} / dt = k_{1П} \cdot C_N C_{OH} - k_{1O} \cdot C_H C_{NO} + k_{2П} \cdot C_N C_{O_2} - k_{2O} \cdot C_O C_{NO} + k_{3П} \cdot C_{N_2} C_O - k_{3O} \cdot C_N C_{NO},$$

при известных концентрациях входящих в него веществ и температуре, влияющей на значения констант скоростей промежуточных реакций образования NO (k_i), разрешимо аналитически. Концентрации N , N_2 , O , H , OH определяются из условия равновесного образования компонентов продуктов сгорания. Для этого используется схема традиционного химического равновесия сгорания углеводородного топлива по определению концентраций продуктов сгорания с учетом диссоциации, соответствующих температуре T в зоне сгорания и давлению p в цилиндре. Рассматривается 11 веществ (n компонентов): N , O , H , N_2 , O_2 , H_2 , NO , OH , CO , CO_2 , H_2O , концентрации которых рассчитываются численным решением 11 нелинейных алгебраических уравнений: 7 уравнений представляют химические обратимые реакции равновесия с соответствующими константами равновесия, определяемыми специальной процедурой (подмоделью), и 4 уравнения описывают материальный баланс для элементарного (атомного) состава веществ – N , O , H , C .

При заданной температуре T концентрации веществ c_i в реагирующей

смеси удовлетворяют системе уравнений равновесия

$$\prod_{i=1}^n c_i^{a_{ij}} = K_{c_j}(T), \quad j=1, \dots, m, \quad i=1, \dots, n$$

и системе уравнений материального баланса

$$\sum_{i=1}^n l_{ij} c_i = \frac{\lambda_j}{\nu}, \quad j=1, \dots, r.$$

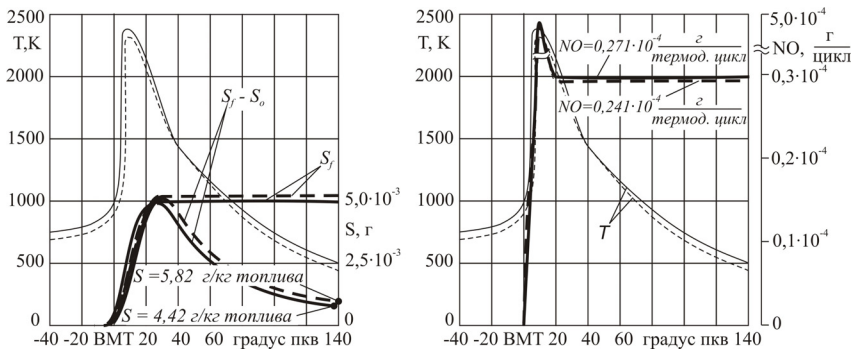
Здесь c_i – молярная концентрация i -го вещества; K_{c_j} – константа равновесия j -ой реакции, определяется специальной процедурой как известная функция температуры; n – количество компонентов в продуктах сгорания; m – количество химических реакций; l_{ij} – элемент молекулярной матрицы, представляющий количество атомов i -го вида в j -м индивидуальном веществе; ν – удельный объем; λ_j – концентрация j -го элемента; r – количество элементов (атомов), составляющих индивидуальные вещества; a_{ij} – стехиометрический коэффициент i -го вещества в j -й реакции.

Результаты численного прогнозирования оксидов азота и сажи для дизеля, технические характеристики которого приведены в табл. 1, представлены на рис. 3. Рассматривается режим максимального крутящего момента, $n = 1400 \text{ мин}^{-1}$.

Таблица 1 – Технические характеристики дизеля Д21

Наименование параметра	Значение параметра	Единица измерения
Диаметр поршня	0,105	м
Ход поршня	0,12	м
Отношение радиуса кривошипа к длине шатуна	0,282	–
Степень сжатия	16,5	–
Число цилиндров	2	шт.
Номинальная мощность	18 (24)	кВт, (л.с.)
Номинальная частота вращения	1800	мин ⁻¹
Объем цилиндра	1,039	дм ³
Топливо	Дизельное топливо	
Плотность топлива	845 (831 – 951)	кг/м ³
Давление впрыскивания	180 – 200	атм

Видно, что момент начала впрыскивания топлива, а, следовательно, и его воспламенение влияют на пиковый уровень температуры в камере сгорания. Более позднее воспламенение, как отмечается в [6], смещает процесс горения ближе к верхней мертвой точке, и существенное повышение давления, температуры и, как следствие NO , возможно уже в конце процесса сжатия.



———— начало впрыскивания топлива – 25° до верхней мертвой точки;
 - - - - - начало впрыскивания топлива – 18° до верхней мертвой точки;

S – итоговый уровень сажи; S_f – уровень сформировавшейся сажи;
 S_o – уровень окисления сажи.

Рис. 3 – Характер изменения эмиссии сажи и монооксида азота.

Заключение. При калибровке модели были использованы результаты экспериментов, полученные в лаборатории ИПМаш НАНУ при разработке и испытаниях макетов фильтров твердых частиц. К сожалению, количественное определение содержания сажи в отработавших газах при методе сравнительного анализа отработавших газов не производилось, но определялась эмиссия сажи косвенным путем через дымность [19], при этом можно говорить о совпадении порядка результатов. Кроме того, сравнения результатов проводились по данным испытаний аналогичного по конфигурации рабочего объема, типу и режимам нагрузки двигателя [20]. Получение и сравнение результатов эксперимента и расчета эмиссии сажи – «скользкий» вопрос. Количественный и качественный состав дизельных твердых частиц изменяется в широких пределах и зависит от типа двигателя, топлива, организации процесса сгорания и технологии очистки отработавших газов. Сажевая, или как ее еще называют, *углеродная фракция* занимает до 75 % общего состава всех твердых частиц, но могут быть колебания от 33 до 90 % [21]. Но такие сведения не уменьшают значения прогнозирования эмиссии, так как полученные в результате численного эксперимента данные по образованию сажи и монооксидов азота дают для данной конфигурации дизеля возможность исследования влияния на эмиссию токсичных составляющих регулировочных параметров двигателя, эксплуатационных нагрузок и состава топлив, в том числе альтернативных. Таким образом, полученные результаты обеспечивают базу для дальнейших исследований.

Список литературы: 1. *Hiroyasu H., Kadota T., Arai M.* Development and Use of a Spray Combustion Modeling to Predict Diesel Engine Efficiency and Pollutant Emissions (part. 1) // Bulletin of the JSME, 1983.– Vol. 26.–№ 214.– P. 569 – 575. 2. *Jung D., Assanis D.H.* Multi-Zone DI Diesel Spray Combustion Model for Cycle Simulation Studies of Engine Performance and Emissions / D. Jung, // SAE Techn. Pap. Ser. – 2001. – № 2001-01-1246. 3. *Левтеров А.М., Левтерова Л.И.* Анализ мате-

математических моделей механизма сажеобразования при сжигании углеводородных топлив // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 5 (979). – С. 130 – 140. **4. Левтеров А.М., Левтерова Л.И.** Численное моделирование рабочего цикла дизеля с непосредственным впрыском. Прогнозирование эмиссии сажи и оксидов азота // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 5 (979). – С. 141 – 154. **5. Вуђе И.И.** Новое о рабочем цикле двигателя. – М.: Mashgiz, 1962. – 271 с. **6. Heywood J.B.** Internal Combustion Engine Fundamental. – New York: McGraw – Hill, 1988. – 930 p. **7. Dec J. E.** A Conceptual Model of DI Diesel Combustion Based on Laser Sheet Imaging // SAE Techn Paper. –1997. – № 970873. **8. Westbrook C.K.** Chemical kinetics of hydrocarbon ignition in practical combustion systems // Proceedings of the Combustion Institute. – 2000. – V. 28. – P. 1563 – 1577. **9. Hiroyasu H., Kadota T.** Models for Combustion and Fjrmation of Nitric Oxide and Soot in Direct Injection Diesel Engines // SAE Techn. Pap. Ser. – 1976. – № 760129. **10. Fusco A., Knox-Kelecy A.L., Foster D.E.** Application of a Phenomenological Soot Model to Diesel Engine Combustion // In: International Symposium COMMODIA, Tokyo. – 1994. – P. 571 – 576. **11. Суровикин В.Ф.** Аналитическое описание процессов зародышеобразования и роста частиц сажи при термическом разложении ароматических углеводородов в газовой фазе // Химия твердого топлива. – 1976. – №. 1. – С. 111 – 122. **12. Binesh A. R., Hossainpour S.** Three Dimensional Modeling of Mixture Formation and Combustion in a Direct Injection Heavy-Duty Diesel Engine // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2008. – V. 2. – P. 176 – 181. **13. Chryssakis C.A., Assanis D.H.** Effect of multiple injections on fuel-air mixing and soot formation in diesel combustion using direct flame visualization and CFD techniques // ASME Internal Combustion Engine Division 2005: Spring Technical Conference, Chicago, IL, USA, April 5-7, 2005. – P. 171 – 180. **14. Arsie I., Pianese C., Sorrentino M.** Effects of Control Parameters on Performance and Emissions of HSDI Diesel Engines: Investigation via Two Zone Modelling // Oil & Gas Science and Technology. – Rev. IFP, 2007. – Vol. 62, №. 4. – P. 457 – 469. **15. Rakopoulos C.D., Rakopoulos D.C., Giakoumis E.G., Kyrtisis D.C.** Validation and sensitivity analysis of a two zone Diesel engine model for combustion and emissions prediction // Energy Conversion and Management. – 2004. – № 45. – P. 1471 – 1495. **16. Kazakov A., Foster D.** Modeling of Soot Formation During DI Diesel Combustion Using a Multi-Step Phenomenological Model // SAE Techn. Pap. Ser. – 1998. – № 982463. **17. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.И.** Окисление азота при горении. – М.: Изд. АН СССР, 1947. – 145 с. **18. Гаврилов В.В.** Математическое моделирование горения топлива и образование окиси азота в дизеле // Изв. вузов. Машиностроение. – 2003.– № 7. – С. 35 – 40. **19. Парсаданов І.В.** Підвищення якості і конкурентоспроможності дизелів на основі комплексного паливно-екологічного критерію // Харків: Видавничий центр НТУ «ХПІ», 2003. – 244 с. **20. Sabau A., Emil O.** Soot Modeling in Diesel Engine // 3rd International Conference on Environmental and Geological Science and Engineering. – Constantza, Romania, 2010, сент. – С. 126 – 131. **21. Звонов В.А., Корнилов Г.С., Козлов А.В.** Оценка и контроль выбросов дисперсных частиц с отработавшими газами дизелей. – М.: Из-во Прима-Пресс-М, 2005. – 312 с.

Bibliography (transliterated): **1.** Hiroyasu, H., T. Kadota and M. Arai. "Development and Use of a Spray Combustion Modeling to Predict Diesel Engine Efficiency and Pollutant Emissions. Part. 1." *Bulletin of the JSME*, Vol. 26. No. 214. 1983. 569–575 Print. **2.** Jung, D., and D. Assanis. "Multi-Zone DI Diesel Spray Combustion Model for Cycle Simulation Studies of Engine Performance and Emissions." *SAE Techn. Pap. Ser.* – No. 2001-01-1246. 2001. Print. **3.** Levterov, A. M., and L. I. Levterova. "Analiz matematicheskikh modelej mehanizma sazheobrazovanija pri szhiganii uglevodородnyh topliv." *Visnyk NTU «KhPI»*. Ser.: *Matematychnе modeljuvannya v tehnicі ta tehnologijah*. No. 5 (979). 2013. 130–140. Print. **4.** Levterov, A. M., and L. I. Levterova. "Chislennoe modelirovanie rabocheho cikla dizelja s neposredstvennym vpryskom. Prognozirovanie emissii sazhi i oksidov azota." *Visnyk NTU «KhPI»*. Ser.: *Matematychnе modeljuvannya v tehnicі ta tehnologijah*. No. 5 (979). 2013. 141–154. Print. **5.** Vibe, I. I. *Novoe o rabochem cikle dvigatelja*. Moscow: Mashgiz, 1962. Print. **6.** Heywood, J. B. *Internal Combustion Engine Fundamental*. New York: McGraw – Hill, 1988. Print. **7.** Dec, J. E. "A Conceptual Model of DI Diesel Combustion Based on Laser Sheet Imaging." *SAE Techn Paper*. No. 970873. 1997. Print. **8.** Westbrook, C. K. "Chemical kinetics of hydrocarbon ignition in practical combustion systems." *Proceedings of the Combustion Institute*. V. 28. 2000. 1563–1577. Print. **9.** Hiroyasu, H., and T. Kadota. "Models for Combustion and Fjrmation of Nitric Oxide and Soot in Direct Injection Diesel Engines." *SAE Techn. Pap. Ser.* No. 760129. 1976. Print. **10.** Fusco, A., A. L. Knox-Kelecy and D. E.

Foster. "Application of a Phenomenological Soot Model to Diesel Engine Combustion." *In: International Symposium COMMODIA*, Tokyo. 1994. 571–576. Print. **11**. Surovikin, V. F. "Analiticheskoe opisanie processov zarodysheobrazovaniya i rosta chastic sazhi pri termicheskom razlozhenii aromaticeskikh uglevodorodov v gazovoj faze." *Himija tverdogo topliva*. No. 1. 1976. 111–122. Print. **12**. Binesh, A., and S. Hossainpour. "Three Dimensional Modeling of Mixture Formation and Combustion in a Direct Injection Heavy-Duty Diesel Engine." *World Academy of Science, Engineering and Technology*. V. 2. 2008. 176–181. Print. **13**. Chryssakis, C. A., and D. N. Assanis. "Effect of multiple injections on fuel-air mixing and soot formation in diesel combustion using direct flame visualization and CFD techniques." *ASME Internal Combustion Engine Division 2005: Spring Technical Conference*, Chicago, IL, USA, April 5-7, 2005. 171–180. Print. **14**. Arsie, I., C. Pianese and M. Sorrentino. "Effects of Control Parameters on Performance and Emissions of HSDI Diesel Engines: Investigation via Two Zone Modelling." *Oil & Gas Science and Technology*. Rev. IFP, Vol. 62. No. 4. 2007. 457–469. Print. **15**. Rakopoulos, C. D., et al. "Validation and sensitivity analysis of a two zone Diesel engine model for combustion and emissions prediction." *Energy Conversion and Management*. No 45. 2004. 1471–1495. Print. **16**. Kazakov, A., and D. Foster. "Modeling of Soot Formation During DI Diesel Combustion Using a Multi-Step Phenomenological Model." *SAE Techn. Pap. Ser.* No. 982463. 1998. Print. **17**. Zel'dovich, Ja. B., P. Ja. Sadovnikov and D. I. Frank-Kameneckij. *Okislenie azota pri gorenii*. Moscow: Izd. AN SSSR, 1947. Print. **18**. Gavrilov, V. V. "Matematicheskoe modelirovanie goreniya topliva i obrabotanie oksii azota v dizele." *Izv. vuzov. Mashinostroenie*. No. 7. 2003. 35–40. Print. **19**. Parsadanov, I. V. *Pidvyshhenja jakosti i konkurentospromozhnosti dyzeliv na osnovi kompleksnogo palyvno-ekologichnogo kryteriju*. Kharkiv: Vydavnychij centr NTU «HPI», 2003. Print. **20**. Sabau, A., and O. Emil. "Soot Modeling in Diesel Engine." *3rd International Conference on Environmental and Geological Science and Engineering*. Constantza, Romania, 2010. 126–131. Print. **21**. Zvonov, V. A., G. S. Kornilov and A. V. Kozlov. *Ocenka i kontrol' vybrosov dispersnyh chastic s otrabotavshimi gazami dizelej*. Moscow: Iz-vo Prima-Press-M, 2005. Print.

Посмунила (received) 06.10.2014

УДК 539.375

О.С. МАЧУГА, канд. фіз.-мат. наук, доц., НЛТУ України, Львів

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ ЛІСОЗАГОТІВЕЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ДЛЯ РОБОТИ НА ТЕРИТОРІЯХ З УХИЛОМ. ЧАСТИНА 3. РОЗРАХУНОК РАМНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Для елементів конструкцій рам і начіпного обладнання лісозаготівельної, сільськогосподарської, дорожно-будівельної техніки під час руху і роботи на територіях з ухилом властиве додаткове навантаження. Несиметричність зовнішнього силового впливу, викликана роботою технологічного обладнання та сумісною дією дотичних складових опорних реакцій рушіїв і сил ваги окремих частин механізму, викликають складний напружено-деформований стан елементів рами та стержневих елементів начіпного обладнання: згин та звичайне або стиснене кручення. Опорні реакції та внутрішні сили фактори структури, що розглядається, запропоновано визначати шляхом використання варіаційного принципу механіки для статично невизначених стержневих систем, а саме узагальнення методу мінімуму потенційної енергії деформації. Сформульовано математичний вираз поставленої задачі. Підхід до розв'язування задач проілюстровано на прикладі розрахунку стріловодної рами.

Ключові слова: розрахунок рами лісозаготівельної техніки, згин та стиснене кручення, варіаційний принцип механіки.

© О. С. Мачуга, 2014