УДК 614.841

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДЕТАЛЯХ МАШИН

А.В. Кулагин, М.А. Спиридонов (Санкт-Петербург)

XX век, безусловно, стал веком, когда поменялся подход к ведению военных действий. Это время стало временем моторов [1] и продолжает оставаться таковым и в XXI веке. Войны моторов – это, прежде всего, войны технологий, но технологии – это не только строительство нового технического образца, но и грамотная эксплуатация уже стоящего на вооружении (или техническом обеспечении). В том числе и образцов техники в энергетических комплексах и системах военного назначения.

В современной военной энергетике возникает задача анализа температурных напряжений и оценки их влияния на детали машин (боевой техники). Влияние температурных напряжений преимущественно оказывает влияние на работу тепловых двигателей при превышающих расчѐтные нагрузках. Для поршневых тепловых машин, используемых в качестве двигателей, эти нагрузки могут возникать вследствие развития расчетной мощности в течение продолжительного времени или превышающей расчетную мощность (например, при пробуксовке наземных транспортных средств), эксплуатации двигателей в жарком климате и ряда других. Повышенные нагрузки характеризуются повышенными напряжениями, возникающими внутри деталей поршневых машин, которые [напряжения] способны привести к отказу (вследствие механического разрушения материала из которого изготовлена та или иная деталь).

Наглядно представить процесс эксплуатации любой детали машин можно в виде орграфа (рисунок 1). В этом графе вершины характеризуют состояния деталей (монтажных узлов), а дуги – процессы перехода из одного состояния в другое в процессе эксплуатации. Вершины характеризуются признаками, изложенными в ГОСТе по надежности [2]. Характеристики вершин приведены в таблице.

Таблица – Характеристика состояний судового дизельного двигателя

Обозначение	Название	Характеристика
С1	Исправное состояние	Состояние объекта, в котором он соответствует всем требованиям, установленным в документации на него
С2	Работоспособное состояние	Состояние объекта, в котором он способен выполнять требуемые функции
С3	Предотказное состояние	Состояние объекта, характеризуемое повышенным риском его отказа
С4	Предельное состояние	Состояние объекта, в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно
С5	Нерабочее состояние	Состояние объекта, в котором он не выполняет ни одной из требуемых функций

При этом переходы из одного состояния (на рисунке 1 это дуги, помеченные символом “а”), в другое возможны как вследствие износа, так и вследствие

восстановления (например, ремонта при использовании различных технологий). Кроме того, любая деталь может находиться какое-то время в одном состоянии, при этом ее свойства будут незначительно меняться (например, будет появляться усталость металла, появляющаяся вследствие воздействия напряжений).

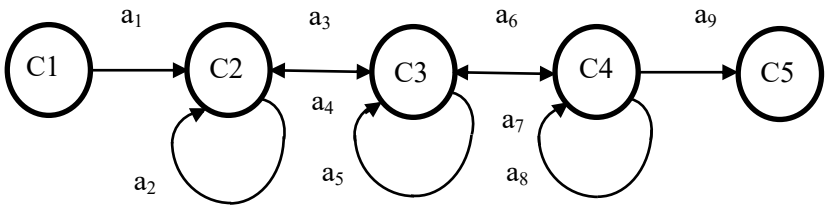

Рис. 1 – Граф переходов состояний детали двигателя

Этот эксплуатационный фактор ставит задачу определения допустимых – по критериям надѐжности – нагрузок. Решением этой задачи, будут являться расчетные предельные напряжения в деталях машины, в зависимости от нагрузки и условий эксплуатации. Однако расчетные напряжения ($\sigma_{\text{р}}$), которые могут возникать в конкретной детали, зависят от ряда факторов и прежде всего от нагрузки на машину (N). Например, для судового двигателя внутреннего сгорания зависимость напряжений в деталях, образующих камеру сгорания, как одни из наиболее напряженных, будет выглядеть следующим образом:

$$\sigma_{\text{р}} = f(N, T_B,\ \ T_{OB}, K), \qquad \sigma_{\text{р}} \to \min \quad , \text{при } N \to \max \tag{1}$$

где:

$\sigma_{\text{р}}$– расчѐтное напряжение в отдельно взятой детали двигателя;

N – нагрузка на двигатель;

T_B – температура воздуха подаваемого в цилиндр двигателя;

К – коэффициент, учитывающий прочие особенности двигателя (распыл струи топлива, сажеобразование, и другие отложения, сопротивление в газовоздушных трактах и т.д.);

T_{OB} – разность температур охлаждающей жидкости до охлаждения рассматриваемой детали (T_{OB1}) и после (T_{OB2}), где:

$$T_{OB} = T_{OB1} - T_{OB2} \tag{2}$$

Собственно, выражение (1) является аналитической моделью, определяющей основные эксплуатационные зависимости. Однако, как с точки зрения проектирования деталей машин, так и с точки зрения эксплуатации, в результате решения задачи о напряжениях требуется получить некие допустимые эксплуатационные параметры, которые можно продиагностировать, позволяющие предотвратить разрушение деталей. Иными словами, предотвратить развитие напряжений, способных вызвать необратимые деформации деталей и повысить надежность эксплуатации. Решить эту задачу можно при помощи моделирования.

Моделирование выбирается как способ проанализировать процессы, происходящие в детали и факторы, на эти процессы воздействующие, или их определяющие. Для решения этой задачи удобно использовать имитационное моделирование, позволяющее смоделировать реальные процессы и прогнозировать

некое развитие этой реальности (в нашем случае напряжений или отказов деталей машин) [3]. При этом, моделирование выполняется в два этапа:

− на первом этапе разрабатывается аналитическая модель, позволяющая выявить основные зависимости и описать процессы (для судового двигателя внутреннего сгорания на этом этапе могут рассматриваться различные зависимости, такие как зависимости тепловыделений от подачи в камеру сгорания топлива и воздуха; теплоотвод от технического состояния системы охлаждения и т.д.), этап завершается выбором диагностических параметров, позволяющим в процессе эксплуатации определять значения необходимых для следующего этапа параметров;

− на втором этапе по определенным на первом этапе зависимостям и с использованием диагностических параметров, прогнозируются (рассчитываются) параметры требуемые (в примере это предельные внутренние напряжения).

Таким образом, задача расчета предельных допустимых напряжений ($\sigma_{\text{р}}$) сводится к выбору наиболее напряженной детали и моделирования зависимости возникновения отказов этой детали от внешних факторов [4].

При решении задачи определения допустимых нагрузок (исходя из условия развития разрушений деталей машин) на двигатель внутреннего сгорания требуется построить некие зависимости, получившие название в теории тепловых двигателей нагрузочных характеристик (если двигатель внутреннего сгорания работает в составе пропульсивного комплекса – то такие характеристики будут именоваться винтовыми).

В качестве примера, рассмотрим влияние подачи топлива в цилиндры двигателя на процесс развития отказа деталей этого двигателя. По предложенной методике определим деталь, имеющую наибольшую вероятность выхода из строя (механического разрушения). Из теории рабочих процессов тепловых двигателей известно, что подача топлива влияет на тепловыделения в камере сгорания. Модель тепловыделения приблизительно можно представить в виде уравнения Рассвейлера и Уитроу (Rassweiler and Withrow), называемой RW моделью [5] Это предположение связано с представлением о том, что изменение нагрузки двигателя зависит от объема цилиндра, количества топлива, поданного в цилиндр и протекания процесса теплопередачи от заряда рабочей смеси к стенкам камеры сгорания, который является политропным. Суммарная теплота по RW модели может быть представлена как интегральная сумма всех тепловых выделений [6]:

$$\Delta Q_{1-2} = \frac{V_{TCD}}{K-1} \{p_2 - p_1 (\frac{V_1}{V_2})^K\} \quad (3)$$

где:

V – объѐм цилиндра в точках верхней мертвой и нижней мертвой;

V_{TDC} – объѐм камеры сгорания;

p – давление в точках верхней мертвой и нижней мертвой;

k – показатель адиабаты.

Наиболее напряженную по температуре деталь принимаем по данным кафедры Э-2 «Комбинированные двигатели и альтернативные энергоустановки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Этой деталью будет является крышка цилиндра [7]. Следовательно, вероятность возникновения отказов в этой сборочной единице в результате возникновения температурных напряжений будет выше, чем у других деталей. Аналогично обстоит ситуация с температурным напряжением, возникающим в поршне, но в отличии от крышки цилиндра, поршень дешевле, его замена технологически проще.

В настоящее время можно выделить 2 типа имитационных моделей:

– дискретные;
– непрерывные.

Для решения задачи расчета предельных допустимых напряжений целесообразнее применить дискретный тип имитационной модели. Выбор обусловлен дискретным методом диагностирования состояния рассматриваемой детали. Для расчета напряжений используется математический аппарат, используемый для решения задач определения параметров нагрузок по критериям надѐжности нагрузок. При решении этих задач, температурные напряжения определяются через расчѐт теплового потока, образованного продуктами сгорания и проходящего через крышку цилиндра. Указанная задача решается при определѐнных допущениях через основные соотношения термоупругости [8].

Рассмотрим подробно решение задачи. Представим крышку цилиндра в виде прямоугольной плиты (рисунок 2).

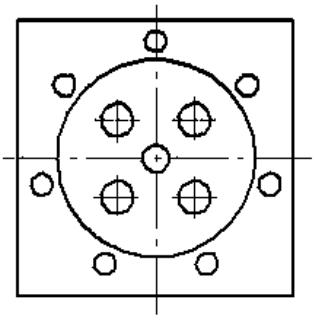

Рис. 2 – Крышка цилиндра двигателя внутреннего сгорания

Примем в качестве граничных условий, что тепловой поток идѐт по нормалям к основной поверхности, а температура в каждой нормали постоянна. Тогда крышку цилиндра можно представить в виде прямоугольной плиты, а процессы температурных напряжений моделировать в двухмерном пространстве (рисунок 3).

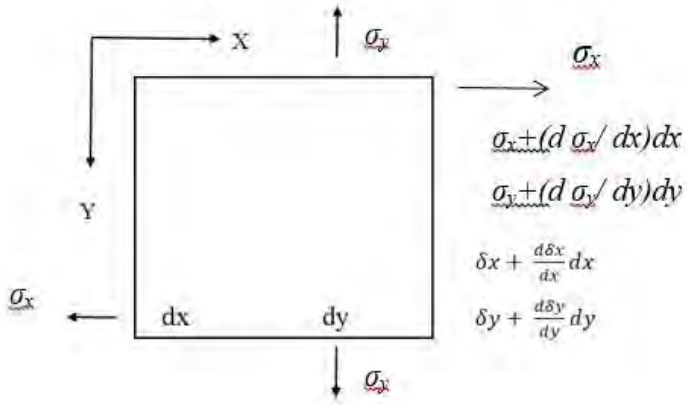

Рис. 3 – Силы, действующие в плоскости *XY* на крышку цилиндра

При выполнении прочностных расчѐтов основное днище крышки цилиндра принимается как бесконечно тонкая пластина, что позволяет при расчѐте использовать двухмерное моделирование

Анализ процесса моделирования возникновения температурных напряжений в крышке цилиндра показывает, что они возникают вследствие неравномерного нагрева крышки с одной стороны и цикличности процессов подвода и отвода теплоты с другой.

σ_y σ_y

Рассмотрим крышку цилиндров как закреплѐнную с двух сторон балку. При неравномерном нагреве балки по ее длине в ней возникают внутренние напряжения. При обратном процессе, охлаждении балки, процесс проходит в обратной последовательности. Тогда основные силы напряжения будут равны по модулю растягивающим (сжимающим) силам и обратны по знаку. В общем случае эти силы можно выразить через следующие зависимости:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E}\left(\sigma_x - \quad \sigma_y\right) + \ \alpha \ T \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E}\left(\sigma_y - \quad \sigma_x\right) + \ \alpha \ T \end{cases} \tag{4}$$

где:

ε_x, ε_y – силы напряжения в декартовых координатах;

E – модуль упругости;

– коэффициент Пуассона;

α T – тепловое расширение, численно равное расширению материала в свободном состоянии при изменении температуры относительно исходной.

Принимая во внимание зависимости (4) и допущения о представлении крышки цилиндра в виде закреплѐнной с двух сторон балки, чья толщина является бесконечно малой, для расчѐта сил в ней возникающих при температурном воздействии целесообразно применять формулу Сивалда [9]

$$\sigma_x = \frac{\mathrm{P}}{\mathrm{A}} + \frac{\mathrm{M}_y}{J} + \frac{d^2M}{dx^2}\left[\frac{1}{2}\left(\frac{y}{c}\right)^3 - \frac{3}{10}\frac{y}{c}\right] \tag{5}$$

где: M_y – изгибающий момент в балке, относительно расстояния;

P – суммарная осевая нагрузка;

A – площадь поперечного сечения;

J – момент инерции;

O – константа, определяемая из граничных условий процесса.

На практике, в крышке цилиндра на температурные напряжения накладываются механические напряжения от действия рабочих газов, затяжки монтажных шпилек и возникающие в процессе обливки самой крышки. Но указанные напряжения малы и в сумме составляют около 10% от температурных напряжений [10]. Крышки цилиндров у транспортных среднеоборотных двигателей преимущественно из высокопрочного чугуна. В частности, на Коломенском заводе для этих целей применяют чугун марки ВПЧ-НМ.

Таким образом, переходя ко второму этапу решения задачи, из уравнения (5) находим предельные параметры, соответствующие максимально допустимым нагрузкам. На практике возможно приближѐнно оценить уровень возникающих напряжений в крышках цилиндров и регулировать значения переменных, обуславливающих рост этих напряжений. Прежде всего, это касается ограничения мощности (N), а также контроля температур (T_B, T_O), как наиболее значимых. Эти ограничения находят отражение в ограничительных характеристиках, как разрабатываемых предприятием – изготовителем, так и эксплуататорами с учѐтом условий работы отдельно взятых агрегатов.

Литература

1. **Покровский Г.И.** Наука и техника в современных войнах. М: Военное издательство, 1959. 140 с.
2. ГОСТ Р 27.002–2015 Межгосударственный стандарт надежность в технике. Термины и определения. Введ. 2017-03-01. М.: Стандартинформ, 2016. 28 с.
3. **Эльберг М.С.** Имитационное моделирование : учеб. пособие / М.С. Эльберг, Н.С. Цыганков. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017, ISBN 978-5-7638-3648-6. 128 с.
4. **Филяев М.П., Якшин А.С.** Актуальные вопросы имитационного моделирования транспортных систем // Информационные системы и технологии теория и практика / Сборник трудов конференции «Информационные системы и технологии. Теория и практика». СПб.: СПбГЛТУ им. С.М.Кирова 2019, С.86-95.
5. **Rassweiler G.M.** Motion pictures of engine flames correlated with pressure cards / G.M. Rassweiler, L. Withrow // SAE Transactions Paper. 1938. №380139. P. 185-204.
6. **Трунов А.И.** Диагностирование и регулировка топливоподающей аппаратуры тепловозного дизеля по критериям характеристик индикаторного тепловыделения : дис. канд. тех. наук : 2.9.3 / Трунов Антон Игоревич ; науч. рук. А.Ю. Коньков ; ФГБОУ ВО ТОГУ. Хабаровск. 2022. 155 с.
7. **Чайнов Н.Д., Раенко М.И., Рыжов В.А.** Прочность теплонапряженных базовых деталей среднеоборотных двигателей внутреннего сгорания. М: Машиностроение, 2015. 360 с.
8. **Мэнсон С.** Температурные напряжения и малоцикловая усталость. М.; - Машиностроение. 1974, 344 с.
9. **Seewald F.** Die Spannungon and Fowmandeungen von Balken mit rechteckigen Querschnitt Abhanal. Aerodyn. Inst,Tech, Hochschi. Aacgen, vol. 7, №11, 1927, P 11-23.
10. **Сальников М.А.** Оценка долговечности крышек цилиндров тепловодных дизелей в зависимости от уровня теплонапряженности : дис. канд. тех. наук : 05.04.02 / Сальников Михаил Анатольевич ; науч. рук. Н.Д.Чайнов ; ПО. Коломенский завод, Коломна, 1984, с. 214.