

УДК 621.43.539.3

А.В. ТРИНЁВ, к.т.н., доц. каф. ДВС НТУ «ХПИ»
В.А. ПЫЛЁВ, д.т.н., проф. каф. ДВС НТУ «ХПИ»
А.А. ЛЕБЕДЕВ, студент НТУ «ХПИ»

ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВЫПУСКНОГО КЛАПАНА БЫСТРОХОДНОГО АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ НА ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

Анализ последних работ в области изучения теплонапряженного состояния (ТНС) деталей камеры сгорания (поршни, головки цилиндров, клапанный узел) автотракторных дизелей с высоким уровнем форсирования по литровой мощности свидетельствует о повышенном внимании к нестационарным тепловым режимам. В частности выпускные клапаны, работают в условиях высокочастотных цикловых и низкочастотных режимах теплосмен, связанных с резкими забросами и просадками нагрузок.

Ключевые слова: толщина стенки, перепады температур, теплонапряженное состояние, нагрузки, переходные режимы, расчетные исследования.

Вступление. Проведенные исследования показывают определяющую роль термической составляющей на возникновение забросов и просадок напряжений в переходных процессах [1,2,3,4]. Причиной ухудшения ТНС при этом называют ограниченный, неравномерный теплоотвод от сравнительно сложной поверхности КС, что способствует возникновению температурных градиентов на установившихся тепловых режимах. Переходные режимы с резкими забросами нагрузки еще в большей степени приводят к росту температурных напряжений.

Выравниванию температуры в объеме теплонагруженной детали как на стационарных, так и нестационарных режимах может способствовать оптимизация формы, геометрии сечения такой детали, выравнивание толщины стенки, более равномерное по сечению распределение металла, что снизит температурные градиенты и соответственно термические напряжения. Выбор рациональной геометрии детали – выпускного клапана требует проведения серии расчетов ТНС.

Анализ публикаций. С целью изучения напряженно-деформированного состояния выпускного клапана быстроходного тракторного дизеля 4ЧН12/14 на переходных режимах сброса и наброса нагрузки на кафедре ДВС НТУ «ХПИ» были проведены расчетно-экспериментальные исследования, включавшие эксперимент на дизеле и математическое моделирование теплового и напряженно-деформированного состояний выпускного клапана на указанных режимах с помощью задаваемых в численном эксперименте управляющих функций. При этом каждая из управляющих функций управляла законом изменения коэффициента теплоотдачи α_T и температурной среды $t^\circ\text{C}$ (граничные условия 3-го рода) во времени для соответствующих участков поверхности клапана. Расчеты температурных полей и термоупругих напряжений и деформаций выполнялись с использованием метода конечных элементов (МКЭ) в перемещениях с использованием вариационного уравнения Лагранжа в приращениях. Математическое обеспечение, разработанное в ИПМашНАН Украины, позволяло учитывать геометрическую и физическую нелинейность при решении задачи механики деформируемого тела. Упомянутые программные средства использовались ранее и подробно описаны в работах [5,6,7,8].

Чтобы уточнить граничные условия и проверить адекватность математической модели, предварительно производилось термометрирование выпускного клапана по четырем контрольным точкам. Используемая для регистрации температур система СИИТ-3 обеспечивала скорость регистрации до 20 измерений в секунду и позволила записать температуры контрольных точек при сбросе-набросе нагрузки через каждые 10, 20, 30, 60, 90, 120, 180, 240, 360с от момента начала переходного режима. Полученные температурные зависимости послужили основой для задания управляющих функций. Критерием правильности выбора управляющих функций служил минимальный разброс между экспериментальными и расчетными значениями температуры. Для принимаемых в дальнейшем рассмотрении управляющих функций расхождение между расчетом и экспериментом не превышало 10 - 12 °С. Методика проведения моторного эксперимента приводится в работе [9,10].

Цель и постановка задачи. Целью исследования является улучшение показателей надежности современных форсированных дизелей автотракторного типа, работающих длительное время в условиях эксплуатации на переходных режимах сброса-наброса нагрузки за счет подбора рациональной геометрии сечения выпускных клапанов.

Для достижения поставленной цели на данном этапе предполагается решить такие задачи:

- на основе экспериментальных исследований уточнить граничные условия (ГУ) задачи теплопроводности и подобрать управляющие функции, изменяющие эти ГУ в зависимости от времени переходного процесса;
- провести сравнительный расчетный анализ нестационарного ТНС для варианта серийного (сплошного) и пустотелого клапана с более равномерным распределением металла по седлу тарелки клапана;
- подтвердить обоснованность перехода к пустотелой конструкции с точки зрения снижения забросов и просадок напряжений, термических градиентов на нестационарных режимах.

Результаты исследования. Перед тем как приступить к анализу полученных расчетных данных, остановимся подробнее на особенностях задания управляющих функций.

Как показали расчеты, наибольшее влияние на температурное поле тарелки клапана оказывают функции, управляющие коэффициентами теплоотдачи и температурой среды по поверхности галтели и нижней поверхности тарелки, обращенной к КС.

Для начальных вариантов расчета управляющие функции по этим поверхностям корректировались так, чтобы они достигали своего максимального значения примерно через 5 с, а через 10 с от начала переходного режима (наброс) принимали значение, соответствующее установившемуся режиму. Однако при таких законах изменения параметров теплоотдачи отклонение от экспериментальных значений на всех временных шагах составило 80 – 120 °С, что свидетельствовало о несоответствии выбранных законов реальному характеру протекания переходного процесса. В дальнейшем для этих участков были назначены линейные законы с выходом на номинальные параметры на 20 – 25-й секунде от начала наброса, что и дало удовлетворительное схождение с экспериментом. Для коэффициента теплоотдачи контактного теплообмена между седлом клапана и направляющей втулкой

принимались управляющие функции, близкие к линейным. Изменение температуры перечисленных выше контактирующих участков задавалось, следуя рекомендациям [4], по экспоненциальному закону:

$$T = T_{\kappa} - (T_{\kappa} - T_{\text{н}}) \cdot e^{-\kappa t}, \quad (1)$$

где $T_{\text{н}}$ – начальное значение температуры;

T_{κ} – конечное значение температуры;

$\kappa = 0,030 - 0,034 \frac{1}{\text{с}}$ – показатель экспоненты изменения температуры;

t – время.

Расчетные исследования проводились для нескольких конструктивных вариантов клапанов, в том числе серийного и пустотелого. Причем со стороны внутренней полости в стержне клапана граничные условия 3-го рода дополнялись граничными условиями 2-го рода, тепловой поток q на этих участках принимался нулевым.

На рис. 1 показана схема задания граничных условий по отдельным участкам клапана, а в табл. 1 приведены соответствующие этим участкам граничные условия. В табл. 2 помещены тепломеханические свойства клапанной стали 4X9C2M.

Для анализа термоупругих напряжений выделим 4 характерные точки клапана (точки 1-4, рис. 1), отличающиеся максимальными абсолютными значениями напряжений. При мгновенном набросе нагрузки, характерном для эксплуатации тракторных дизелей, быстрый нагрев огневой поверхности тарелки клапана приводит к тому, что составляющие термоупругих напряжений, в частности окружные напряжения σ_{θ} , принимают значения большие, чем при установившемся режиме.

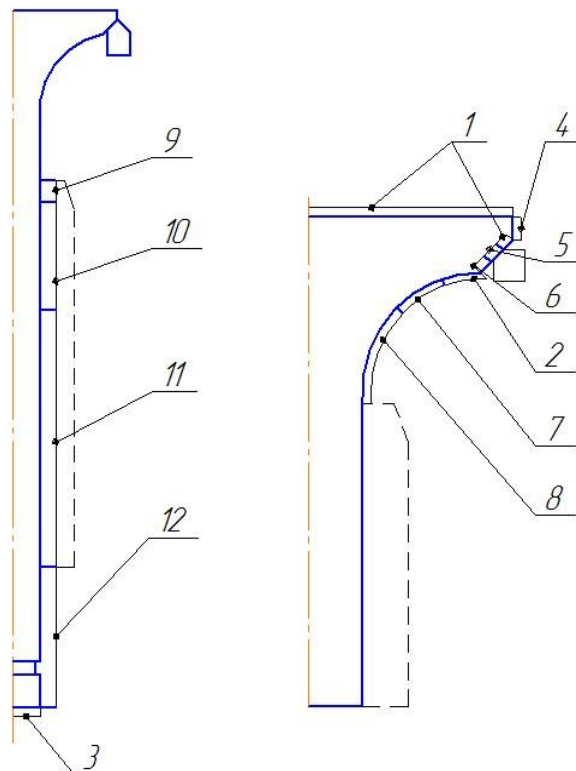


Рисунок 1 – Схема задания граничных условий по участкам при решении задачи теплопроводности.

Окружные сжимающие и растягивающие напряжения являются наибольшими из всех составляющих, оказывают наибольшее влияние на напряженно-деформированное состояние и, кроме того, вследствие знакопеременного характера, позволяют оценить максимальные значения амплитуды отклонения напряжений при сбросе и набросе от номинального, соответствующих установившемуся режиму. Поэтому величину заброса δ термоупругих напряжений будем оценивать по окружной составляющей:

$$\delta = \frac{\sigma_{\theta \max} - \sigma_{\theta \text{ном}}}{\sigma_{\theta \text{ном}}} \cdot 100\% \quad (2)$$

Таблица 1 – Значение коэффициентов теплоотдачи и температур в контрольной зоне выпускного клапана

| Номер участка | Холостой ход | | Номинальный режим | | Номер участка | Холостой ход | | Номинальный режим | |
|---------------|-----------------------------|---|-----------------------------|---|---------------|-----------------------------|---|-----------------------------|---|
| | $t, \text{ }^\circ\text{C}$ | $\frac{\alpha_T, \text{ В}_T}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ | $t, \text{ }^\circ\text{C}$ | $\frac{\alpha_T, \text{ В}_T}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ | | $t, \text{ }^\circ\text{C}$ | $\frac{\alpha_T, \text{ В}_T}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ | $t, \text{ }^\circ\text{C}$ | $\frac{\alpha_T, \text{ В}_T}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ |
| 1 | 248 | 180 | 752 | 660 | 7 | 144 | 130 | 570 | 650 |
| 2 | 190 | 170 | 640 | 650 | 8 | 142 | 130 | 565 | 650 |
| 3 | 40 | 65 | 60 | 65 | 9 | 96 | 300 | 170 | 370 |
| 4 | 240 | 180 | 752 | 660 | 10 | 74 | 250 | 160 | 350 |
| 5 | 152 | 1700 | 335 | 1900 | 11 | 65 | 200 | 150 | 300 |
| 6 | 146 | 130 | 580 | 650 | 12 | 40 | 65 | 60 | 65 |

Таблица 2 – Теплотехнические характеристики клапанной стали 4Х9С2М

| Характеристика | Значение характеристики при $t \text{ }^\circ\text{C}$ | | | | |
|---|--|-----|-----|-----|-----|
| | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 |
| $\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ | 18 | 22 | 22 | 24 | 25 |
| $\alpha \cdot 10^6, \text{ 1}/\text{град}$ | 10 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| $E, \text{ ГПа}$ | 205 | 202 | 196 | 187 | 172 |

Максимальные значения окружных сжимающих напряжений для серийного клапана устанавливаются при набросе нагрузки примерно к 20 с переходного процесса. Наибольший заброс напряжений наблюдается в точке 3, расположенной на кромке огневой поверхности. Здесь максимальные напряжения превышают номинальные значения в 5,4 раза. Кроме того, в этой точке наблюдается и максимальная скорость роста напряжений (6,35 МПа/с). Для точки 4, расположенной в зоне контакта седла и клапана, характерно плавное уменьшение сжимающих напряжений при набросе и такое же плавное их возрастание при сбросе нагрузки. Следует отметить знакопеременный характер окружных напряжений в точке 3. При сбросе нагрузки сжимающие (отрицательные) напряжения переходят в растягивающие (положительные). Максимум растягивающих напряжений также наблюдается на 20-й секунде переходного процесса, а амплитуда знакопеременного напряжения при сбросе-набросе составляет 202 МПа. Зона кромки вследствие этого подвержена в наибольшей степени трещинам усталостного характера, что подтверждает и опыт эксплуатации дизелей.

Не изменяя граничных условий по поверхности клапана и управляющих функций, моделировалось тепловое и напряженно-деформированное состояние пустотелого клапана. При этом при сходных температурных полях отмечаются заметные отличия от серийного варианта по напряжениям. Заброс δ в точках 1 - 3 составил всего 43 - 47% (при 437% для серийного варианта), отсутствовала также перемена знака напряжений в этих точках.

Динамику изменения окружных напряжений для рассмотренных случаев можно проследить на рис. 2 и 3.

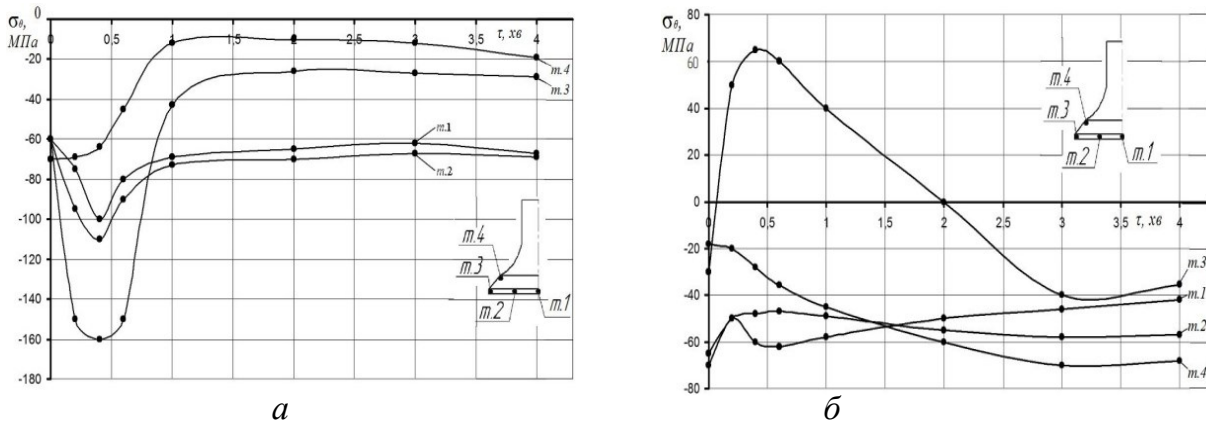


Рисунок 2 – Динамика окружных напряжений σ_{θ} (МПа) в характерных точках серийного клапана: а – при набросе нагрузки; б – при сбросе нагрузки.

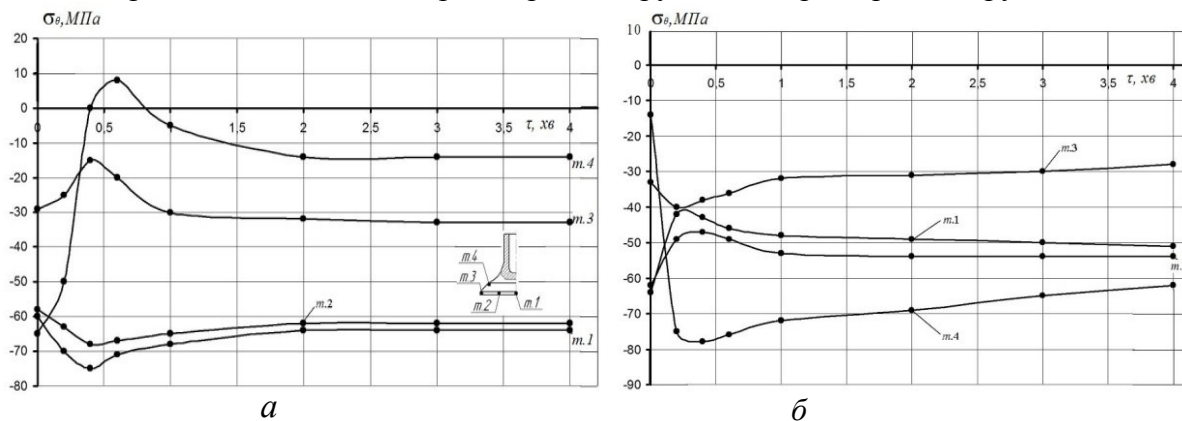


Рисунок 3 – Динамика окружных напряжений σ_{θ} (МПа) в характерных точках пустотелого клапана: а – при набросе нагрузки; б – при сбросе нагрузки.

Выводы. Расчет напряженно-деформированного состояния клапана подтвердил предположение о том, что причиной усталостных трещин могут быть макротеплосмены на переходных режимах сброса и наброса нагрузки. Как следует из приведенных исследований, учет в качестве максимальных только напряжений на установившихся номинальных режимах не соответствует действительности и может привести к ошибкам при оценке долговечности клапана.

Из анализа полученных данных можно также заключить, что пустотелый клапан лучше приспособлен к работе при низкочастотных теплосменах, и от него следует ожидать более высокую долговечность по сравнению с серийным вариантом.

Список литературы: 1. Современные дизели: повышение топливной экономичности и длительной прочности / Под ред. А.Ф. Шеховцова / Ф.И. Абрамчук, А.П. Марченко и др.

– К.: Техника, 1992. – 272 с. **2.** *Абрамчук Ф.И.* Двигуни внутрішнього згорання: у 6т. – т.6: Надійність ДВЗ / *Ф.И. Абрамчук, М.К. Рязанце, А.Ф. Шеховцов*; 39 ред. *А.П. Марченка, А.Ф. Шеховцова*. – Харків: ХНАДУ, 2004 – 324 с. **3.** *Абрамчук Ф.И.* Основы повышения термоусталостной и длительной прочности поршней быстроходных форсированных дизелей: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.04.02 / *Абрамчук Федор Иванович*. – Х. – 1992. – 46 с. **4.** *Шеховцов А.Ф.* Исследование нестационарных тепловых режимов поршней перспективных тракторных дизелей: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.04.02 / *Шеховцов Анатолий Федорович*. – Х. – 1978. – 43 с. **5.** *Гонтаровский П.П., Найденов Я.Б., Шиманский Б.К.* Решение двухмерных нестационарных задач термопластичности с учетом геометрической нелинейности методом конечных элементов // Проблемы машиностроения. – 1987. – Вып. 31. – С. 11-15. **6.** Напряженно-деформированное состояние поршня быстроходного дизеля при нестационарных нагрузениях // *А.Ф. Шеховцов, П.П. Гонтаровский, Ф.И. Абрамчук* и др. // Двигатели внутр. сгорания. – 1989. – Вып.49. – С. 20-26. **7.** *Подгорный А.Н.* Задачи контактного взаимодействия элементов конструкций / *Подгорный А.Н., Гонтаровский П.П., Киркач Б.Н.* – К. : Наук. думка, 1989. – 232 с. **8.** *Тринева А.В.* Влияние локального воздушного охлаждения на температуру клапанной перемычки головки цилиндров форсированных автотракторных дизелей / *А.В. Тринева, П.Д. Гончар* // двигатели внутреннего сгорания. – 2005. - №1. – С. 63-67. **9.** *Тринева А.В.* Улучшение напряженно-деформированного состояния выпускных клапанов форсированных тракторных дизелей: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.04.02 / *Тринева Александр Владимирович*. – Х. – 1995. – 24 с. **10.** *Тринёв А.В.* Экспериментальное определение температуры деталей клапанного узла автотракторного дизеля на нестационарных режимах нагружения / *А.В. Тринёв, А.Г Косулин, В.Т. Коваленко, А.Н. Авраменко* // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. - №1-2 (24-25). – С. 4-11.

Bibliography (transliterated): **1.** *Sovremennye dizeli: povyshenie toplivnoj jekonomichnosti i dlitel'noj prochnosti / Pod red. A.F. Shehovcova / F.I. Abramchuk, A.P. Marchenko i dr.* – K.: Tehnika, 1992. – 272. **2.** *Abramchuk F.I.* Dviguni vnutrishn'ogo zgorjannja: u 6t. – t.6: Nadijnist' DVZ / *F.I. Abramchuk, M.K. Rjazance, A.F. Shehovcov*; 39 red. *A.P. Marchenka, A.F. Shehovcova*. – Kharkiv: KhNADU, 2004 – 324. **3.** *Abramchuk F.I.* Basis for improving thermal fatigue and long-term strength of high-speed piston forced diesel engines: avtoref. dis. dokt. tehn. nauk: 05.04.02 / *Abramchuk Fedor Ivanovich*. – Kharkov. – 1992. – 46. **4.** *Shehovcov A.F.* Issledovanie nestacionarnyh teplovyh rezhimov porshnej perspektivnyh traktornyh dizelej: avtoref. dis. dokt. tehn. nauk: 05.04.02 / *Shehovcov Anatolij Fedorovich*. – Kh. – 1978. – 43. **5.** *Gontarovskij P.P., Najdenov Ja.B., Shimanskij B.K.* Reshenie dvuhmernih nestacionarnyh zadach termoplastichnosti s uchetom geometricheskoj nelinejnosti metodom konechnyh jelementov Problemy mashinostroenija. – 1987. – Issue. 31. – 11-15. **6.** Naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie porshnja bystrohodnogo dizelja pri nestacionarnyh nagruzenijah *A.F. Shehovcov, P.P. Gontarovskij, F.I. Abramchuk* i dr. Dvigateli vnutr. sgoranija. – 1989. – Issue. 49. – 20-26. **7.** *Podgornyj A.N.* Zadachi kontaktnogo vzaimodejstvija jelementov konstrukcij / *Podgornyj A.N., Gontarovskij P.P., Kirkach B.N.* – K. : Nauk. dumka, 1989. – 232. **8.** *Trinev A.V.* Vlijanie lokal'nogo vozdushnogo ohlazhdenija na temperaturu klapannoj peremychki golovki cilindrov forsirovannyh avtotraktornyh dizelej / *A.V. Trinev, P.D. Gonchar* dvigateli vnutrennego sgoranija. – 2005. - No1. – 63-67. **9.** *Trinev A.V.* Uluchshenie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija vypusknyh klapanov forsirovannyh traktornyh dizelej: avtoref. dis. kand. tehn. nauk: 05.04.02 / *Trinev Aleksandr Vladimirovich*. – Kharkov. – 1995. – 24. **10.** *Trinjov A.V.* Jeksperimental'noe opredelenie temperatury detalej klapannogo uzla avtotraktornogo dizelja na nestacionarnyh rezhimah nagruzenija / *A.V. Trinjov, A.G Kosulin, V.T. Kovalenko, A.N. Avramenko* // Vestnik NTU «KhPI». – 2006. - No1-2 (24-25). – 4-11.

Надійшла (received) 19.02.2015