

В. Е. Тарасенко¹, А. А. Жешко², О. О. Мухля¹

¹ УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: trs9@yandex.ru;

² РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства»

г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: azeshko@gmail.com

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО СТЕНДА ДЛЯ РАБОТЫ С СИСТЕМАМИ «НАСОС-ФОРСУНКА» И «НАСОС-ТРУБКА-ФОРСУНКА»

Аннотация. Рассмотрены основные результаты модернизации диагностического стенда и приведены расчеты на прочность, подтверждающие надежность предлагаемой конструкции стенда

Ключевые слова: диагностический стенд, двигатель внутреннего сгорания, система питания, инжектор, давление, привод, муфта.

V. E. Tarasenko¹, A. A. Zheshko², O. O. Mukhlya¹

¹ EI “Belarusian State Agrarian Technical University”

Minsk, Republic of Belarus

E-mail: trs9@yandex.ru

² RUE “SPC of the National Academy of Sciences of Belarus on agricultural mechanization”,

Minsk, Republic of Belarus

E-mail: azeshko@gmail.com

THE RESULTS OF THE MODERNIZATION OF THE DIAGNOSTIC STAND FOR WORKING WITH THE “PUMP-NOZZLE” AND “PUMP-TUBE-NOZZLE” SYSTEMS

Abstract. The main results of the modernization of the diagnostic stand are considered and strength calculations are given, confirming the reliability of the proposed design of the stand

Keywords: tractor, diagnostic stand, internal combustion engine, power system, injector, pressure, drive, clutch.

Введение

Выполнение работ по техническому диагностированию, обслуживанию и ремонту машин невозможно осуществить без специального технологического оборудования, использование которого на сельскохозяйственных предприятиях позволяет облегчить тяжелые и трудоемкие операции, повысить производительность труда и качество выполнения работ, снизить и исключить влияние вредных факторов производства на окружающую среду и здоровье человека [1].

Направления совершенствования топливной аппаратуры сегодня концентрируются на повышении давления впрыска и улучшении дисперсности впрыснутого топлива, что в сочетании с параллельно разрабатываемыми системами очистки и дожигания выхлопных газов приведет к увеличению экономичности дизелей при обеспечении параметров токсичности выхлопных газов в пределах установленных норм [2–4]. Новые разработки все больше удовлетворяют форсированию дизелей по мощности, снижению веса, повышению надежности в эксплуатации [1]. Улучшение топливной экономичности и экологичности автотракторных ДВС решается высоко-технологичной модернизацией их топливных систем [5–6]. В настоящей работе рассматриваются основные результаты модернизации диагностического стенда и приведены расчеты на прочность, подтверждающие надежность предлагаемой конструкции.

В последние десятилетия ведущие производители автотракторных двигателей освоили новое поколение дизельных двигателей, которые оснащены топливными системами с давлениями впрыскивания до 300 МПа и выше и имеют электронное управление. При этом выполнение перспективных экологических нормативов (Tier-3 и EURO-5 и выше) возможно с применением не только аккумуляторной топливной системы Common Rail, как наиболее подходящей для дизелей всех экологических классов и наиболее серийно производимой, но и систем «насос-форсунка» (компонент UIS) (рис. 1) и «насос-трубка-форсунка (единичный ТНВД)» (компонент UPS) (рис. 2) [7].

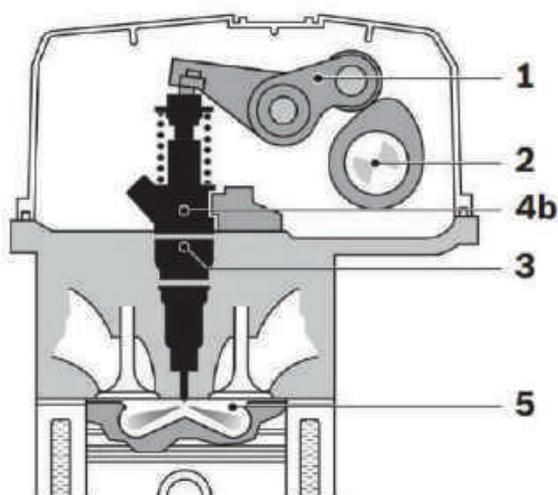


Рис. 1. Размещение компонента UIS для двигателей грузовых автомобилей: 1 – коромысло; 2 – распределительный вал; 3 – насос-форсунка UIS для грузовых автомобилей; 4b – электромагнитный клапан, расположенный внутри насос-форсунки; 5 – камера сгорания

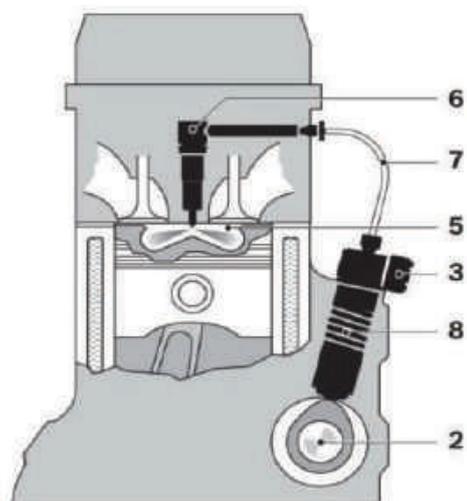


Рис. 2. Размещение компонента UPS для двигателей грузовых автомобилей: 2 – распределительный вал; 3 – электромагнитный клапан; 5 – камера сгорания; 6 – форсунка; 7 – магистраль высокого давления; 8 – компонент UPS

Система UIS конструктивно состоит из одного изделия, в котором конструктивно объединены и элемент создания давления, и исполнительный элемент впрыскивания топлива (рис. 3). Система UPS состоит из разнесённых в пространстве элементов создания давления (единичного насоса), впрыскивания (форсунки) и соединительного трубопровода (рис. 4).



Рис. 3. Изображение компонента UIS для двигателей грузовых автомобилей Delphi 2pin и Delphi 4pin



Рис. 4. Изображение компонента UPS для двигателей грузовых автомобилей Bosch, Delphi

Для обеспечения оптимальных показателей по расходу топлива, эффективной мощности дизеля и соответствия все более возрастающим требованиям к токсичности отработавших газов требуется своевременное выполнение работ по диагностированию, регулировке и ремонту дизельной топливной аппаратуры.

На кафедре «Технологии и организация технического сервиса» УО «БГАТУ» в образовательном процессе использовался стенд для тестирования топливных насосов высокого давления (ТНВД) ДД 10-04, который положительно зарекомендовал себя при тестировании ТНВД классов «Евро 0, 1, 2» в части проверки на нём насосов рядных, роторных и распределительных типов. Комплектация стенда не позволяла осуществлять тестирование систем «насос-форсунка» и систем «насос-трубка-форсунка». Проведенная модернизация позволила осуществлять проверку насос-форсунок, форсунок, работающих в паре с индивидуальными ТНВД и индивидуальных ТНВД [7].

Важным обстоятельством при принятии решения была возможность одновременного использования двух методик определения качественных показателей работы насос-форсунок и насосных секций:

- методика компании BOSCH, где осуществляется определение длительности посадки клапана-золотника с момента активации ВР (begin of injection period);

- методика компании DELPHI (оборудование HARTRIDGE), где осуществляется определение временных характеристик нарастания внутреннего давления топлива, определение периода создания максимального (пикового) внутреннего давления, с использованием датчика LOAD CELL.

Конструктивно насос-форсунки и насосные секции способны создавать высокое давление топлива посредством его сжатия. А к функциям блоков управления впрыском (ЭБУ) относят контроль длительности задержки впрыска от начала подъёма плунжера и сжатия топлива в надплунжерном пространстве и контроль длительности впрыска путём активации электромагнита. Электромагнит воздействует на золотниковый элемент (анкер), а тот в свою очередь перекрывает (запирает) дренажное отверстие слива. С этого момента начинается создание высокого давления топлива и соответственно впрыск топлива в цилиндр двигателя.

По методике компании BOSCH на мобильной машине и на диагностическом стенде контролируется момент запираания дренажного отверстия. При перемещении и посадке (запирании) анкера происходит электромагнитное токовое возмущение, момент которого, в соответствии с границами регулирования, ЭБУ определяет как начало процесса создания давления топлива и далее уже ведёт расчёт длительности впрыска, опираясь на полученное значение.

По методике компании DELPHI (Hartridge) на стенде, благодаря наличию тензометрического датчика LOAD CELL, происходит измерение изменения внутреннего давления топлива в соответствии с моментами задержки и активации впрыска. Также по диаграммам внутреннего давления топлива и их положению относительно контрольных точек давления происходит кодирование насос-форсунок и насосных секций с последующим прописыванием полученных на стенде кодов в ЭБУ ДВС.

Также предложено установить в модернизированный стенд датчик давления топлива BOSCH на 270 МПа (для определения пикового давления при тестировании систем с насосными секциями).

В стенд дополнительно установили: тестовый САМБОХ с изменяемым ходом плунжера от 10 до 20 мм, блок управления «ПОТОК-UIS», блок измерения производительности «Поток FM-2», радиатор охлаждения тестовой жидкости; дополнительные фильтры для защиты высокоточной системы измерения от воздействия грязи и металлических частиц, выходящих из испытуемого компонента; оптический инкрементальный энкодер на 2500 точек (для определения положения кулачка); топливопроводы.

Внешний вид и конструктив стенда после модернизации соответствует современным требованиям эстетики и безопасности промышленного оборудования (рис. 5).

К настоящему времени модернизированный диагностический стенд ДД 10-04 с безмензурочным блоком измерения «Поток FM-2» и блоком управления «Поток-UIS» позволяет выполнять проверку и тестирование насос-форсунок, форсунок (работающих в паре с индивидуальными ТНВД) и индивидуальных ТНВД.

В соответствии с рис. 5 стенд ДД 10-04 после модернизации включает следующие основные элементы:

- асинхронный электродвигатель привода АИРМ132М2У3 (мощностью 15 кВт, с частотой вращения 1430 мин⁻¹);

- бак (45 л) с установленным на его крышке асинхронным электродвигателем АИР80А4У3 с подкачивающим насосом БГ12-4УХЛ4 и фильтрами;
- нагреватель (1,5 кВт) калибровочного масла в баке (емкостью 45 л);
- систему термостабилизации калибровочного масла с двумя охладителями (радиатором) и датчиком для контроля температуры калибровочного масла ISO 4113, подаваемого к тестируемому компоненту с заданным диапазоном настройки ($40 \pm 2^\circ\text{C}$);
- SAMBOX с дополнительными адаптерами для установки тестируемых компонентов;
- приводную муфту;
- систему фильтрации калибровочного масла, состоящую из фильтров Bosch 1 457 434 437;
- масло-бензостойкие топливопроводы диаметром 10 мм и 8 мм;
- полугибкие топливопроводы высокого давления топлива «PARKER»;
- блок управления «Поток-UIS» для управления стендом совместно с измерительным блоком «Поток FM-2»;
- защитный экран с блокировкой его открытого состояния.

Определение параметров работы компонентов производится по заданной программе, состоящей из тест-планов, с возможностью тестирования в ручном или автоматическом режимах.

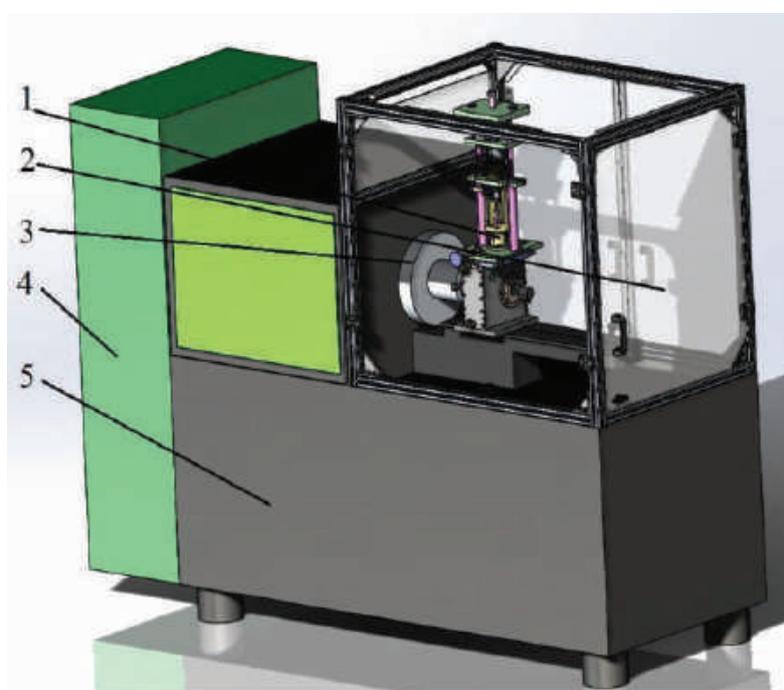


Рис. 5. Модернизированный стенд ДД 10-04:
1 – SAMBOX; 2 – защитный экран; 3 – маховик; 4 – электродвигатель; 5 – стенд

Модернизированный стенд позволяет [7]:

- проверять легковые и грузовые компоненты фирм BOSCH, DELPHI, SIEMENS (VDO), CATERPILLAR, L'ORANGE, CUMMINS и многих других;
- автоматически переключать напряжение питания (12В/24В) в зависимости от типа проверяемого компонента;
- измерять частоту вращения электродвигателя стенда;
- управлять частотой вращения вала привода стенда;
- управлять направлением вращения электродвигателя стенда;
- управлять нагревателем и охладителем тестовой жидкости;
- управлять пускателем топливоподкачивающего насоса (ТПН);
- осуществлять автоматическое, ручное либо внешнее управление созданием высокого давления в топливной рампе;

- создавать пользовательские тест-планы для проверки компонентов с созданием профиля сигнала (напряжение открытия, ток открытия, напряжения удержания, ток удержания, напряжение закрытия и др.);
- отображать графики изменения давления благодаря датчику LOAD CELL (рис. 6 и 7);
- формировать отчеты с результатами измерений в диагностической карте;
- подключиться к ПК.

Модернизированный диагностический стенд ДД 10-04 с безмензурочным блоком измерения «Поток FM-2» и блоком управления «Поток-UIS» после завершения работ по наладке размещен в лаборатории технического сервиса топливной аппаратуры и агрегатов гидросистем кафедры «Технологии и организация технического сервиса».

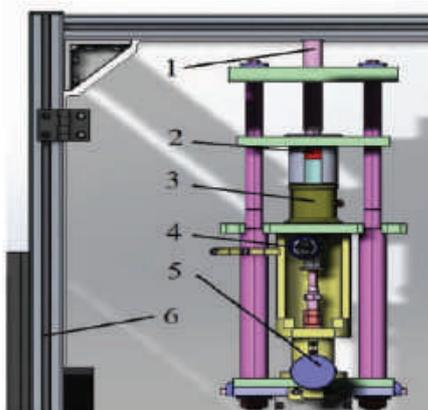


Рис. 6. Модернизированный стенд ДД 10-04 (рабочая зона): 1 – прижимной винт; 2 – датчик нагрузки LOAD CELL; 3 – адаптер для установки компонента; 4 – тестируемый компонент; 5 – винт регулировки хода толкателя (10–20 мм); 6 – каркас защитного экрана



Рис. 7. Датчик нагрузки (наращения давления в компоненте) LOAD CELL: 1 – точка приложения силы (соединения с компонентом); 2 – информационный кабель; 3 – опорная площадка

Рассмотрим основные функции стенда. Автоматическое управление оборотами вала привода стенда построено на PID-регуляторе и позволяет стабилизировать обороты в диапазоне $\pm 10 \text{ мин}^{-1}$. Автоматическая термостабилизация позволяет настроить температуру калибровочного масла, подаваемого к испытуемому компоненту, с диапазоном гистерезиса $40 \pm 2^\circ\text{C}$. Для улучшения термостабилизации в стенде имеется 2 активных радиатора охлаждения. Один термостабилизирует жидкость, выходящую из тестируемого компонента, а второй – для общей термостабилизации системы охлаждения калибровочного масла. Для измерения производительности инжекторов мы выбрали «Поток FM-2», 2-хканальный измеритель весового типа, в нашем случае используется один канал измерения. Из недостатков следует отметить более долгое получение первых значений наливов инжекторов (около 10–15 сек). Из достоинств – простота конструкции, что позволит не беспокоиться о загрязненном топливе, поступающем к каналам измерителя; отсутствие математической зависимости от температуры поступающего калибровочного масла; простота калибровки; простота постгарантийного обслуживания.

Наличие в системе оптического энкодера и возможности подключения дополнительного датчика давления топлива позволит широко использовать данный стенд в научно-исследовательских целях и получить ответы на вопросы о формировании нестабильных наливов форсунок, о происхождении и причинах возникновения пульсаций давления в гидравлических системах низкого и высокого давления топлива, определении зависимости скорости создания внутреннего давления топлива в компоненте от скорости набегания втулки на кулачок и многих других.

Проведенная модернизация позволила достичь широкого круга функциональных возможностей при работе с насос-форсунками, форсунками (работающими в паре с индивидуальными ТНВД) и индивидуальными ТНВД без значительных финансовых затрат (в сравнении с новыми диагностическими стендами подобных функциональных возможностей).

На рис. 8 представлена расчетная схема нагружений и закреплений датчика с целью моделирования напряженно-деформированного состояния в системе Компас-3D с библиотекой АРМ FEM. Датчик установлен на опорной площадке и крепится к ней посредством болтового соединения, образуя тем самым закрепление F1. Температура датчика T2 составляет 40°C, на опорную площадку отводится температура T1, равная 30°C. На верхнюю площадку датчика действует распределенная нагрузка, которая составляет 250 Н/мм², на опорную площадку передается усилие 500 Н.

Для выполнения расчетов принимаем сетку, состоящую из 4-х узловых тетраэдров с максимальной длиной стороны элемента 3 мм. Коэффициент максимального сгущения поверхности $K_c = 1$, коэффициент разряжения в объеме $K_p = 1,5$. Количество узлов – 13191 (рис. 9).

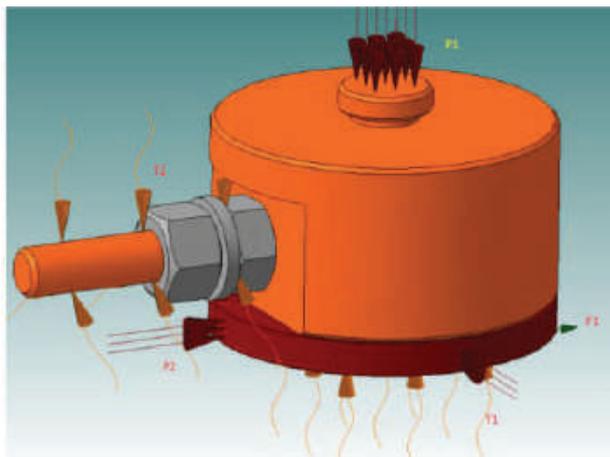


Рис. 8. Схема нагружений и закреплений датчика нагрузки

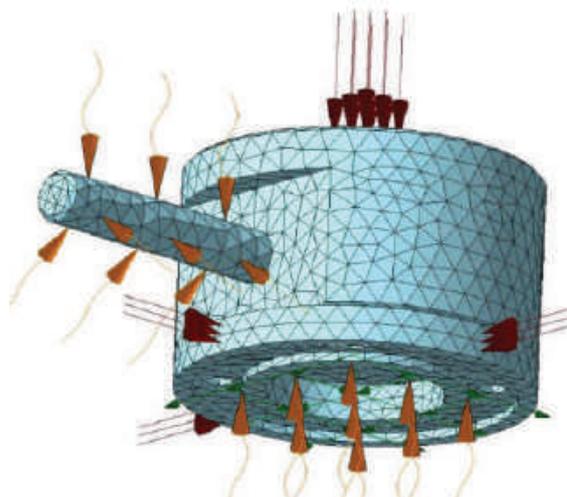


Рис. 9. Результат разбиения модели методом конечных элементов

В табл. 1 приведены характеристики материала, из которого изготовлена опорная площадка датчика нагружения.

Таблица 1. Характеристики материала, из которого изготовлена опорная площадка датчика нагружения

Предел текучести [МПа]	235
Модуль упругости нормальный [МПа]	200000
Коэффициент Пуассона	0,3
Плотность [кг/м ³]	7800
Температурный коэффициент линейного расширения [1/С]	0,000012
Теплопроводность [Вт/(м*С)]	55
Предел прочности при сжатии [МПа]	410
Предел выносливости при растяжении [МПа]	209
Предел выносливости при кручении [МПа]	139

Указываем на 3D-модели соответствующие нагрузки и закрепления, для проведения дальнейших расчетов воспользуемся методом конечных элементов. Метод конечных элементов, как и многие другие численные методы, основан на представлении сплошного тела его дискретной моделью и замене дифференциальных уравнений, описывающих напряженно-деформированное состояние сплошных тел системой алгебраических уравнений. Суть метода заключается в том, что область, занимаемая сплошным телом, разбивается на некоторое число малых, но конечных по размерам подобластей. Последние носят название конечных элементов, а сам процесс разбивки – дискретизацией.

Инерционные характеристики модели представлены в таблице 2.

На рис. 10 представлены параметры расчета усталостной прочности датчика. При этом коэффициент чувствительности материала к местным напряжениям составляет 0,5. Теоретический коэффициент концентрации напряжений равен 1. Коэффициент масштабного фактора 1.

Таблица 2. Инерционные характеристики модели

Наименование	Значение
Масса модели [кг]	0,225833
Центр тяжести модели [м]	(-0,000264; 0,000001; 0,013536)
Моменты инерции модели относительно центра масс [кг·м ²]	(0,000027; 0,000023; 0,000052)
Реактивный момент относительно центра масс [Н·м]	(-2.22826; -58.913621; 0.26601)
Суммарная реакция опор [Н]	(-116.134127; 2.068466; 239893.3375)
Абсолютное значение реакции [Н]	239893,365619
Абсолютное значение момента [Н·м]	58,956346

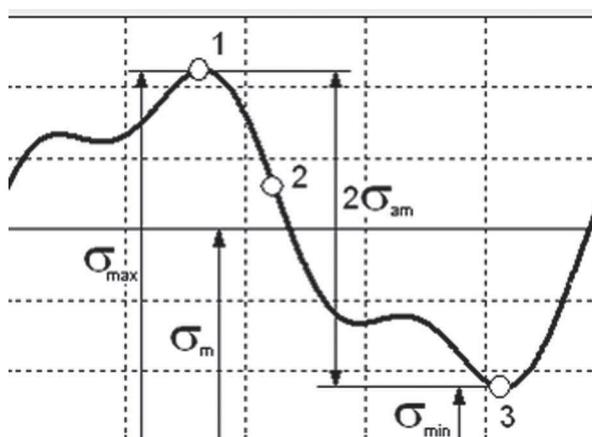


Рис. 10. Параметры расчета усталостной прочности датчика

Результаты статистического расчета

Эквивалентное напряжение по Мизесу находится в пределах 2698,5 МПа. Суммарное линейное перемещение составляет 0,17 мм. Коэффициент запаса по текучести 0,087...1000. Коэффициент запаса по прочности 0,15...1000.

На рис. 11–14 представлены результаты расчета эквивалентного напряжения, суммарного линейного перемещения, карта результатов деформации и карта главных напряжений.

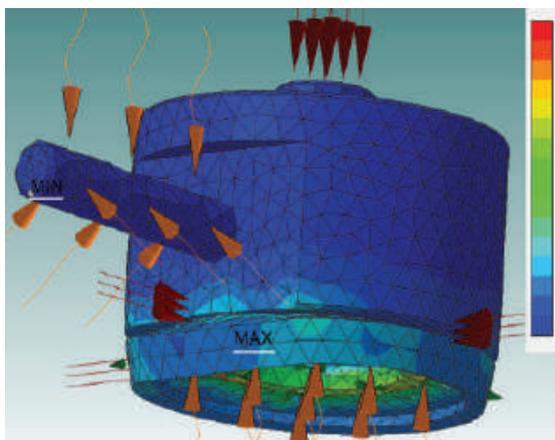


Рис. 11. Эквивалентное напряжение по Мизесу

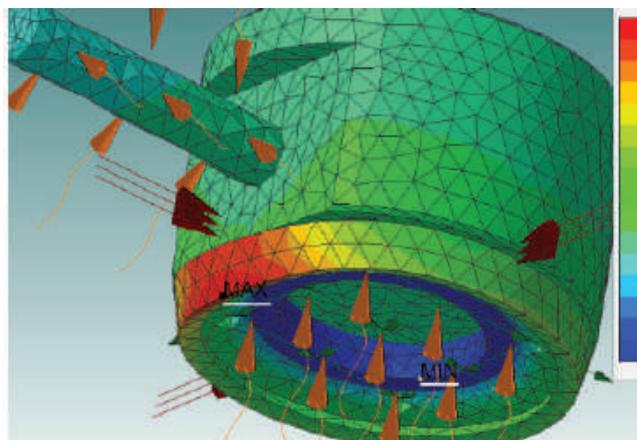


Рис. 12. Суммарное линейное перемещение

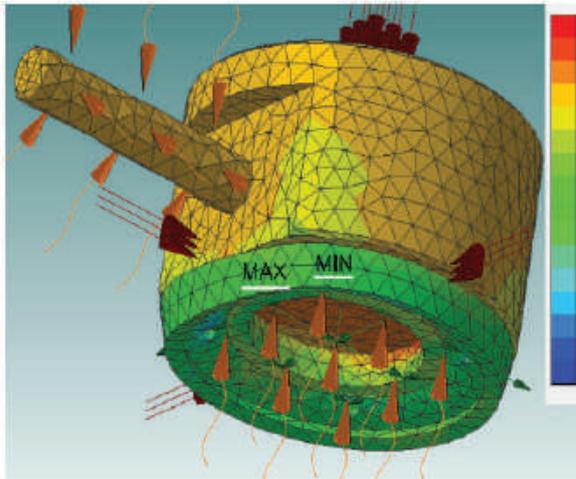


Рис. 13. Карта результатов деформации

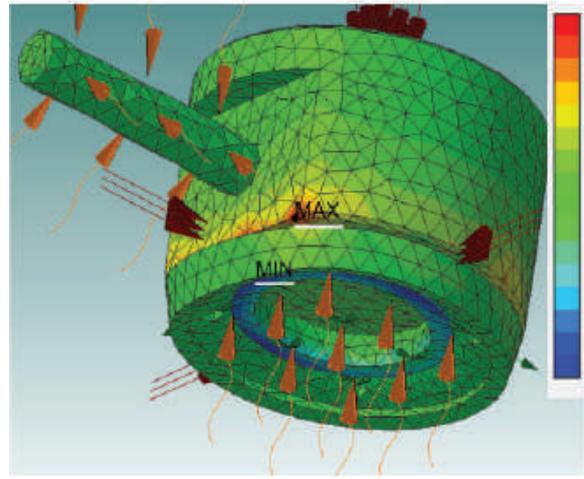


Рис. 14. Карта главных напряжений

Результаты расчета собственных частот представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты расчета собственных частот

№	Частота [рад/с]	Частота [Гц]
1	26794,039899	4264,403895
2	27034,079415	4302,607371
3	43606,546939	6940,197497
4	43817,322049	6973,743397
5	91393,227107	14545,683859

Результаты расчета, представленные на рис. 11–14, показывают, что геометрические параметры и прочностные свойства датчика подобраны удовлетворительно. В перспективе при использовании более высоких нагрузок необходимо уменьшить размер технологического отверстия в опорной площадке, поскольку из рисунка 14 (карта главных напряжений) видно, что чрезмерные размеры отверстия является причиной концентрации напряжений и могут привести к незначительным деформациям.

С целью прогнозирования вероятной деформации опорной площадки проведено моделирование поведения датчика нагрузки в среде ANSYS. Нагрузки приняты в 10 раз больше, чем фактические. При чрезмерных нагрузках результаты общей деформации опорной площадки представлены на рис. 15.

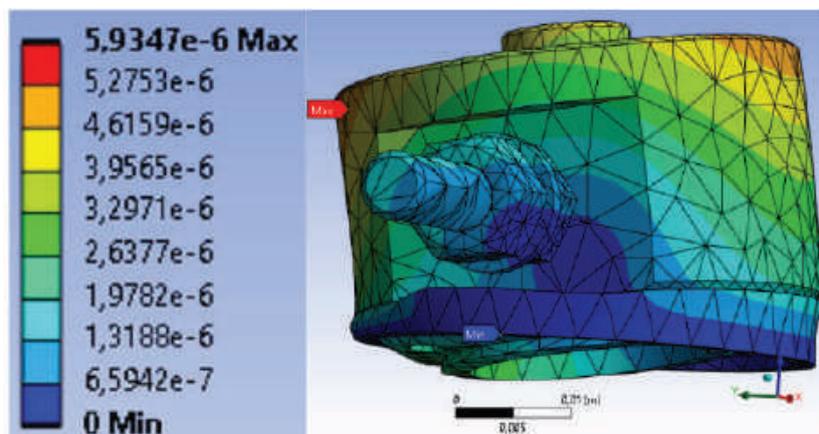


Рис. 15. Общая деформация опорной площадки датчика нагрузки в случае увеличения фактических нагрузок в 10 раз

Как видно из рис. 15, при воздействии в течение 1 с чрезмерных нагрузок, превышающих фактические в 10 раз, опорная площадка подвергается деформациям от $6,5942 \cdot 10^{-7}$ м до $2,6377 \cdot 10^{-6}$ м. Наибольшим деформациям подвержен корпус датчика, причем максимальное значение деформации в верхней части корпуса может достигать $4,6159 \cdot 10^{-6}$ м. Учитывая, что столь высокие нагрузки в процессе эксплуатации датчика маловероятны, можно утверждать, что прочность опорной площадки обеспечивает высокую надежность конструкции.

Заключение

Модернизированный диагностический стенд ДД 10-04 позволяет проверять компоненты фирм BOSCH, DELPHI, SIEMENS (VDO), CATERPILLAR, L'ORANGE, CUMMINS и многих других. Функциональные возможности стенда позволяют автоматически переключать напряжение питания в зависимости от типа проверяемого компонента; управлять нагревателем и охладителем тестовой жидкости, а также пускателем топливоподкачивающего насоса (ТПН); осуществлять автоматическое, ручное либо внешнее управление созданием высокого давления в топливной рампе; создавать пользовательские тест-планы для проверки компонентов и др.

Выполнен расчет напряженно-деформированного состояния и статической прочности датчика нагрузки в системе прочностного анализа АРМ FEM, которая является дополнением к пробной версии КОМПАС-3D v18.1. Результаты расчета показывают, что геометрические параметры и прочностные свойства датчика и опорной площадки подобраны удовлетворительно.

Выполнены дополнительные расчеты датчика и опорной площадки в программе ANSYS 2021 R1. Расчет показал, что датчик и опорная площадка не испытывают чрезмерных нагрузок, поэтому дополнительное упрочнение конструкции не требуется.

Список использованных источников

1. Якубович, А. И. Экономия топлива на тракторах: монография / А. И. Якубович, Г. М. Кухаренок, В. Е. Тарасенко. – Минск: БНТУ, 2009. – 229 с.
2. Тарасенко, В. Е. Анализ топливных систем дизелей с электронным управлением топливоподачей / В. Е. Тарасенко, А. А. Жешко // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. темат. сб. / Нац. акад. наук Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва. – Минск, 2016. – Вып. 50. – С. 52–57.
3. Тарасенко, В. Е. Анализ топливных систем дизелей с механическим и электронно-актуаторным управлением топливоподачей / В. Е. Тарасенко, А. А. Жешко // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. темат. сб. / Нац. акад. наук Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по механизации сел. хоз-ва. – Минск, 2016. – Вып. 50. – С. 58–64.
4. Расширение функциональных возможностей диагностического стенда ДД 10-01 [Электрон. ресурс] / В. Е. Тарасенко [и др.] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2022. – № 2. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2022/2/st_215.pdf. – Дата доступа: 01.10.2022. – DOI: <https://doi.org/10.51419/202122215>.
5. Грехов, Л. В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учебник для вузов / Л. В. Грехов, Н. А. Иващенко, В. А. Марков. – М.: Легион-Автодата, 2004. – 344 с.
6. Шумовский, В. А. Улучшение показателей транспортного дизеля путем совершенствования процессов распыливания топлива и смесеобразования: дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 / В. А. Шумовский – Москва, 2016. – 165 с.
7. Мухля, О. О. Расширение функциональных возможностей стенда ДД 10-04 / О. О. Мухля, С. В. Горностай ; науч. рук. В. Е. Тарасенко // Техсервис-2022 : материалы научно-практической конференции студентов и магистрантов, Минск, 12–13 мая 2022 г. – Минск: БГАТУ, 2022. – С. 19–24.