ISBN 978-5-901722-00-8

УДК 621.43.057

РАСШИРЕНИЕ ДИАПАЗОНА УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ ДВУХТОПЛИВНЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК НА СЖИЖЕННОМ ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

Иванченко Александр Андреевич[1], профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой ДВС и АСЭУ
e-mail: prof_ivanchenko@mail.ru
Кононов Андрей Владимирович, аспирант
e-mail: Andrey19991207@yandex.ru

[1] Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы устойчивой работы двухтопливных дизельных двигателей на сжиженном природном газе (СПГ) с запальным дозированием жидкого топлива. Особое внимание уделено детонационным процессам, возникающим из-за нестабильности сгорания, и их влиянию на надежность цилиндропоршневой группы (ЦПГ). Проведен анализ факторов, способствующих детонации, включая неоднородность топливовоздушной смеси, нестабильность воспламенения и локальные перегревы. Предложены методы диагностики и предотвращения детонации на основе анализа индикаторных диаграмм и вибрационных сигналов. Разработаны рекомендации по оптимизации впрыска, состава смеси и управления двигателем, направленные на повышение устойчивости работы и соответствие экологическим нормам IMO Tier III.

Ключевые слова: двухтопливный двигатель, СПГ, детонация, устойчивость сгорания, ЦПГ, оптимизация впрыска, диагностика детонации.

EXPANDING THE STABILITY RANGE OF DUAL-FUEL DIESEL ENGINES ON LIQUEFIED NATURAL GAS

Aleksandr A. Ivanchenko[1], Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Internal Combustion Engines and Automation of Marine Power Plants
e-mail: prof_ivanchenko@mail.ru
Andrey V. Kononov, Doctoral student
e-mail: Andrey19991207@yandex.ru

[1] Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint Petersburg, Russia

Abstract. The article examines the challenges of stable operation in dual-fuel diesel engines running on liquefied natural gas (LNG) with pilot liquid fuel injection. Special attention is given to detonation processes caused by combustion instability and their impact on the reliability of the cylinder-piston group (CPG). The study analyzes factors contributing to detonation, including fuel-air mixture heterogeneity, ignition instability, and local overheating. Methods for detonation diagnostics and prevention are proposed, based on indicator diagram analysis and vibration signal

processing. Recommendations for injection optimization, mixture composition, and engine control are developed to enhance operational stability and compliance with IMO Tier III environmental standards.

Keywords: dual-fuel engine, liquefied natural gas (LNG), knocking, combustion stability, cylinder-piston group, injection optimization, detonation diagnostics.

Введение

Двухтопливные двигатели, работающие на сжиженном природном газе (СПГ) с запальным дозированием жидкого топлива, представляют собой ключевое направление развития современных судовых энергетических установок, обеспечивающее значительное снижение эмиссии вредных веществ при сохранении высоких энергетических показателей. Однако сложность рабочих процессов в таких двигателях, связанная с одновременным использованием газообразного и жидкого топлива, создает предпосылки для возникновения нестабильностей сгорания, среди которых особую опасность представляет детонационное воспламенение топливовоздушной смеси. Детонация в двухтопливных двигателях представляет собой ударно-волновой режим горения, характеризующийся сверхзвуковым распространением фронта пламени и сопровождающийся резкими скачками давления, способными достигать 15-20 МПа. Подобные явления приводят к возникновению ударных нагрузок на элементы цилиндропоршневой группы, вызывая преждевременный износ деталей и разрушение ЦПГ. Особенностью детонационных процессов в двигателях с запальным поджигом является их неопределённый характер, что существенно осложняет прогнозирование и предотвращение опасных режимов работы. Физико-химические механизмы возникновения детонации в двухтопливных двигателях определяются комплексом взаимосвязанных факторов. Ключевыми из них являются:

- Неоднородность топливовоздушной смеси, обусловленная особенностями смесеобразования при совместной подаче газообразного и жидкого топлива
- Временная и пространственная нестабильность воспламенения запальной дозы
- Локальные перегревы в камере сгорания, приводящие к появлению самовоспламеняющихся очагов
- Влияние детонационной стойкости газового топлива, определяемой его углеводородным составом

Современные экологические требования (IMO Tier III) ужесточают нормативы по выбросам оксидов азота (NOx) и твердых частиц, что стимулирует переход судового транспорта на газомоторное топливо. Однако повышение степени сжатия и оптимизация рабочих процессов для выполнения экологических норм одновременно увеличивают риск возникновения детонационных процессов. В этой связи разработка эффективных методов предотвращения детонации становится критически важной задачей для обеспечения надежной эксплуатации судовых энергетических установок. В представленном исследовании проведен комплексный анализ детонационных явлений в двухтопливных двигателях, включающий:

1. Практическое исследование характеристик сгорания во время детонации
2. Анализ влияния состава топливной смеси на склонность к детонации
3. Оценку эффективности различных методов подавления детонации

Особое внимание уделено анализу параметров рабочего процесса, таких как скорость нарастания давления, максимальное давление сгорания, температура газов и их корреляция с возникновением детонационных явлений. Предложены критерии оценки детонационной опасности, основанные на анализе индикаторных диаграмм и спектральном анализе

вибрационных сигналов. Практическая значимость работы заключается в разработке рекомендаций по:

- Оптимизации параметров впрыска запального топлива
- Выбору рационального состава топливной смеси
- Настройке систем управления двигателем для предотвращения опасных режимов
- Разработке алгоритмов раннего детектирования признаков детонации

Результаты исследования позволяют существенно повысить надежность и экологичность двухтопливных двигателей, что имеет важное значение для современного судостроения в условиях ужесточающихся экологических требований и роста спроса на газомоторное топливо.

Физико-химические основы детонации в двухтопливных двигателях на газовом топливе

Неконтролируемая детонация в двухтопливных двигателях представляет собой аномальное сгорание топливовоздушной смеси, при котором распространение фронта пламени происходит не равномерно, как при нормальном горении, а сопровождается резкими скачками давления и ударными волнами. Данное явление возникает вследствие сложного взаимодействия физико-химических процессов в камере сгорания при работе на газовом топливе, таком как сжиженный природный газ (СПГ), основным компонентом которого является метан (до 90% и более). Физический механизм детонации начинается с образования локальных горячих точек в камере сгорания, которые могут возникать из-за повышенной температуры, локального перегрева или наличия углеродистых отложений на стенках цилиндра. Эти зоны становятся очагами преждевременного воспламенения, инициируя неконтролируемые химические реакции. В результате формируются фронты детонационной волны, распространяющиеся со сверхзвуковой скоростью и вызывающие резкие скачки давления, оказывающие разрушительное воздействие на элементы двигателя. Ключевыми физическими факторами, способствующими возникновению детонации, являются:

- высокая степень сжатия, приводящая к росту температуры и давления в конце такта сжатия;
- повышенная температура в камере сгорания, ускоряющая предпламенные реакции;
- наличие остаточных отработавших газов, изменяющих теплофизические свойства смеси;
- избыточная подача запального топлива в такте сжатия или газового топлива на впуске, приводящая к образованию локальных переобогащённых зон.

Особую роль играет неравномерность распределения топлива в камере сгорания, приводящая к формированию областей с избыточной концентрацией метана даже при стехиометрическом соотношении в целом. Такие зоны обладают повышенной склонностью к детонации. Распространение детонационной волны описывается моделью Зельдовича-Неймана-Дёринга (ZND), согласно которой скорость детонации определяется показателем адиабаты рабочего тела и тепловым эффектом реакции. В этой модели детонационная волна представляет собой ударный фронт, за которым следует зона химической реакции, поддерживающая его распространение. Сверхзвуковой характер горения (превышающий скорость звука в данной среде) приводит к резким динамическим нагрузкам, вызывающим механические повреждения поршневой группы и других элементов двигателя.

С химической точки зрения, детонация метановоздушных смесей обусловлена цепными реакциями окисления углеводородов, протекающими в три основные стадии:

1. **Инициирование цепных реакций**

Процесс начинается с воспламенения запального топлива, которое при сгорании генерирует свободные радикалы (H•, O•, OH•). Температура в зоне горения достигает 2000 K и выше, что создаёт условия для интенсивного окисления метана.

2. **Окисление метана**

Метан вступает в сложные цепные реакции с образованием промежуточных соединений:

- Образование метильного радикала:

Формирование пероксидного радикала и его распад:

- Накопление формальдегида (CH_2O) и гидроксильных радикалов (OH•), которые ускоряют последующие стадии окисления.

3. **Автокаталитическое ускорение**

На этой стадии происходит лавинообразное накопление свободных радикалов и перекисных соединений (например, гидропероксида метана CH_3OOH), что резко увеличивает скорость реакции. При достижении критической концентрации промежуточных продуктов происходит самовоспламенение смеси до подхода нормального фронта пламени, формируя детонационную волну.

Детонация в двухтопливных двигателях на газовом топливе является результатом сочетания физических и химических факторов: неравномерного распределения смеси, образования локальных перегретых зон и цепных реакций окисления метана. Для предотвращения этого явления необходимо оптимизировать состав топливовоздушной смеси, регулировать степень сжатия и минимизировать образование углеродистых отложений. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку методов подавления детонации, включая использование присадок, изменяющих химическую кинетику горения, и совершенствование систем управления подачей топлива.

Основные причины и факторы возникновения детонаций

В рассматриваемом двигателе HHI 8H35DF неконтролируемая детонация представляет собой одно из наиболее опасных явлений, которое может существенно повлиять на эксплуатационные характеристики двигателя и его компонентов, а также на его долговечность и работоспособность. Процесс детонации характеризуется внезапным и неконтролируемым повышением давления в камере сгорания, что вызывает разрушение ЦПГ, что в последствии приводит к значительному снижению эффективности двигателя и дальнейшему выходу из строя. Причины и факторы, способствующие развитию неконтролируемой детонации, разделяются на несколько основных категорий.

1. Несоответствие характеристик газового топлива и условий для его сгорания. В двигателе HHI 8H35DF могут использоваться различные виды топлива, такие как тяжелое топливо и газ, что значительно повышает требования для их качества и состава. Понимание этого явления требует учета химической и физической природы используемого топлива, а также характеристик камеры сгорания и рабочих параметров двигателя. В процессе сгорания газовоздушная смесь должно гореть равномерно, начиная с момента подачи запального топлива и заканчивая полным сгоранием в соответствие с фазами рабочего цикла двигателя. В отличии от работы на тяжелом топливе, газовое топливо, как правило, имеет более высокую летучесть и отличается физико-химическими характеристиками, что требует более точной настройки двигателя и учета ряда факторов для предотвращения детонаций. Если же газ не соответствует необходимым характеристикам, таким как его химический состав и метановое число, это может привести к преждевременному воспламенению смеси, вызывая резкое повышения температуры и давления внутри камеры сгорания. Важным фактором, влияющим на детонацию при работе на природном газе,

является состав самого газа. Природный газ, используемый в качестве топлива, может содержать различные примеси, такие как сернистые соединения, азот и другие химические элементы, изменяющие его горючие свойства. Например, высокое содержание азота в газе снижает его теплотворную способность, что напрямую влияет на рабочие параметры двигателя, снижая его мощность и увеличивая расход топливного газа, высокое содержание водорода и пропана вызывает повышенный риск возникновение детонации, из-за высокой скорости горения, низкой детонационной стойкости и высокой теплотворной способности.

2. Нарушения в системе подачи топлива и свежего заряда воздуха. Для обеспечения стабильной и надежной работы на газовом топливе, требуется точная настройка клапанов подачи газа (SOGAV) и соотношение стехиометрии топливо-свежий заряд. В нормальных эксплуатационных условиях двигатель должен работать с точно настроенным стехиометрическим соотношением газ-воздух, расчет для метана представлен ниже:

Для метана 1 $\frac{\text{кг}}{\text{моль}} CH_4$ = 16.04 кг, для кислорода 1 $\frac{\text{кг}}{\text{моль}} O_2$ = 32 кг

Для расчета используем воздух вместо кислорода:

78% N_2 (3.76 моль) + 21% O_2 (1 моль) = 4.76 моль

$$CH_4 + 2(O_2 + 3.76\ N_2) = CO_2 + 2H_2O + 2\ (3.76)\ N_2 \quad (1)$$

Таким образом получаем стехиометрическое соотношение 17.2 кг воздуха/кг метана. Если подача газа стишком велика, или плотность воздуха уменьшена, например, из-за перегрева свежего заряда воздуха, это может привести к несвоевременному воспламенению, что способствует возникновению детонационных процессов.

3. Неисправность в системе запального зажигания. В газодизельных двигателях, работающих по принципу воспламенения газовоздушной смеси от запального впрыска дизельного топлива, исправность запальной форсунки является критически важным фактором для обеспечения стабильного и контролируемого процесса сгорания. Нарушение работы данного компонента может привести к возникновению детонационных процессов, что особенно актуально при использовании сжиженного природного газа (СПГ) в качестве основного топлива. Основной механизм возникновения детонации при неисправности запальной форсунки связан с изменением характера воспламенения и последующего горения топливной смеси. В нормальных условиях запальная форсунка обеспечивает впрыск строго дозированного количества дизельного топлива, которое, воспламеняясь, создает устойчивый очаг горения для последующего распространения фронта пламени в газовоздушной смеси. При нарушении работы форсунки (засорении, износе сопловых отверстий) происходит ряд негативных явлений.

Во-первых, уменьшение количества впрыскиваемого дизельного топлива приводит к образованию недостаточно энергичного запального факела. Это вызывает задержку воспламенения основной газовой смеси, в результате чего значительная часть топлива начинает сгорать не в оптимальный момент цикла, а с существенным опозданием. В таких условиях давление в цилиндре достигает пиковых значений уже после прохождения поршнем верхней мертвой точки, что создает предпосылки для возникновения ударных волн и детонационного сгорания.

Во-вторых, нестабильная работа форсунки может приводить к неравномерному распределению запального факела в камере сгорания. Локальные переобогащенные или переобедненные зоны смеси создают условия для возникновения множественных очагов самовоспламенения. Особенно опасна ситуация, когда часть газовой смеси воспламеняется от отложений нагара, а не от штатного запального факела. Это приводит к хаотичному распространению фронтов пламени и резким локальным повышениям давления, характерным для детонационного процесса.

В-третьих, при значительном износе форсунки может наблюдаться подтекание дизельного топлива в период между основными впрысками. Это вызывает

преждевременное воспламенение части смеси еще до момента штатного запального впрыска, создавая условия для возникновения разнонаправленных фронтов горения и последующей детонации.

Особую опасность данные процессы представляют при работе на СПГ, так как метан, являющийся его основным компонентом, имеет высокое метановое число и в нормальных условиях проявляет значительную стойкость к детонации. Однако при нарушении условий воспламенения даже это топливо становится подверженным детонационному сгоранию. Кроме того, при использовании СПГ с примесями более тяжелых углеводородов или водорода вероятность возникновения детонации при неисправности запальной форсунки существенно возрастает из-за изменения характеристик горения топливной смеси. Таким образом, поддержание запальной форсунки в исправном состоянии является важнейшим условием предотвращения детонации в газодизельных двигателях, работающих на СПГ. Регулярная диагностика, своевременная очистка и замена изношенных форсунок позволяют обеспечить оптимальные условия воспламенения газовоздушной смеси и стабильность рабочего процесса во всех режимах эксплуатации

Практический анализ и выявлений причины возникновения детонации

В данной главе рассматривается случай детонации, вызванной неисправностью системы подачи газа, а также анализируются методы её диагностики и устранения. Исследование проводилось на вспомогательном двухтопливном четырехтактном дизельном двигателя HHI 8H35DF оснащённом системой управления HiMSENDFECS. Для контроля детонации использовались:

— Пьезоэлектрический датчик детонации, преобразующий акустические вибрации КС в аналоговый сигнал и передающий данные в модуль обнаружения детонаций (KDM);

— Датчик давления в цилиндре, передающий информацию в блок контроля цилиндра (CMM);

— Датчик температуры отработавших газов;

На основании полученных данных от датчика детонации и от датчика давления система контроля двигателя ECS (рисунок 1) принимает решения о изменении рабочих параметров двигателя с целью снижения риска преждевременного воспламенения топливовоздушной смеси.

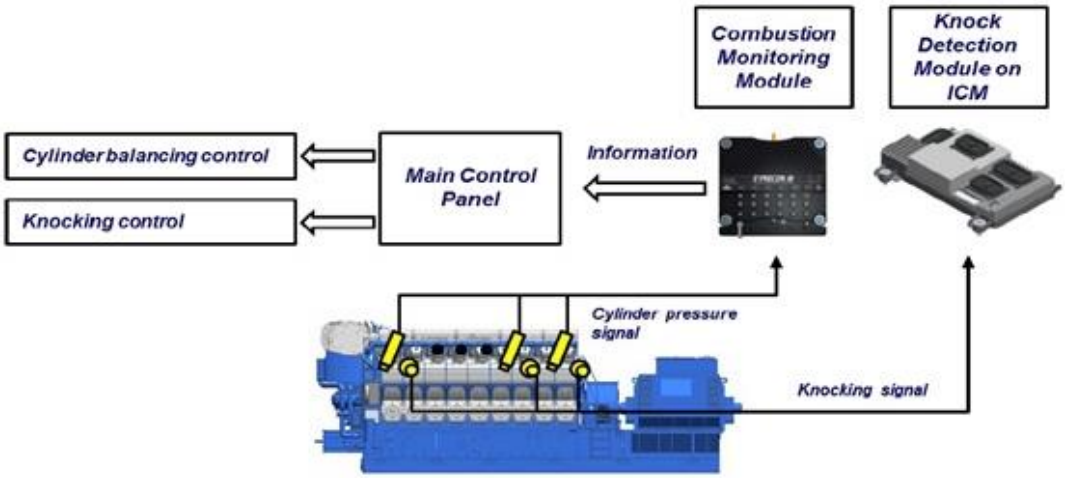

Рисунок 1 – Блок-схема системы автоматического обнаружение детонационных рисков

До возникновения детонации двигатель функционировал в штатном режиме при нагрузке 63 %. Параметры температуры и давления в трех исследуемых цилиндрах, представлены на рисунке 2.

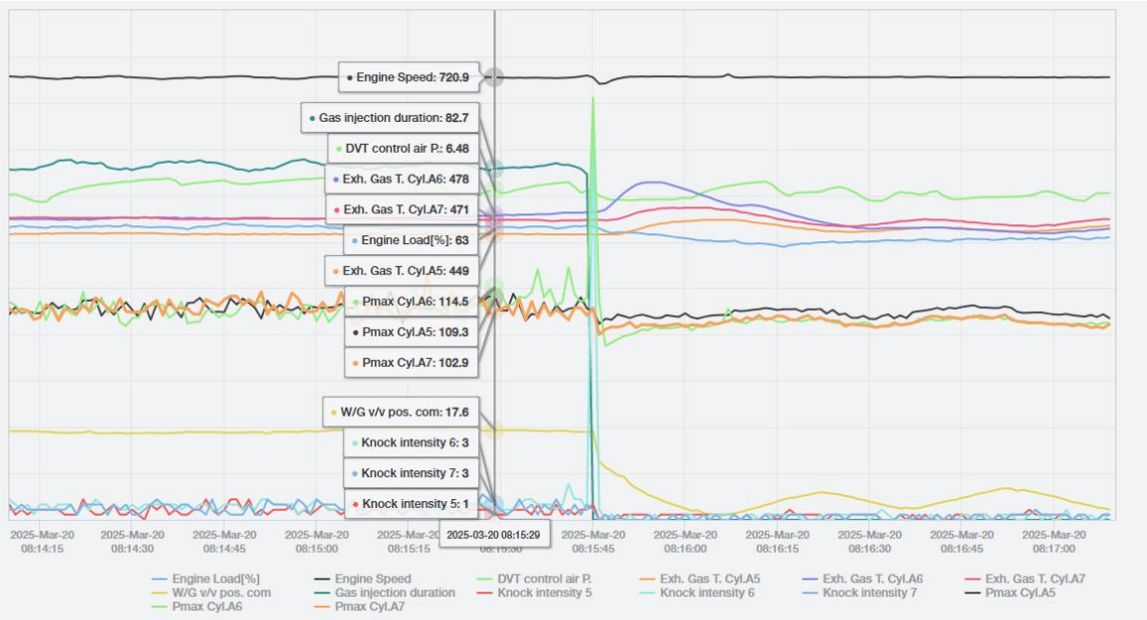

Рисунок 2 – Параметры работы двигателя HHI 8H35DF при нагрузке 63%

Нарушение оптимального соотношения воздух-топливо, возникающее при переизбытках газа, за счет некорректной настройки или неисправности газового клапана, чрезмерная или недостаточная подача запального топлива через пилотные форсунки, может вызывать ряд критических последствий, таких как рост температуры и давления в цилиндре, образование локальных перегревов, неравномерность сгорания смеси.

При обнаружении слабых детонаций (рисунок 3), система ECS начинает вносить изменения в состав топливовоздушной смеси путем настройки угла опережения зажигания.

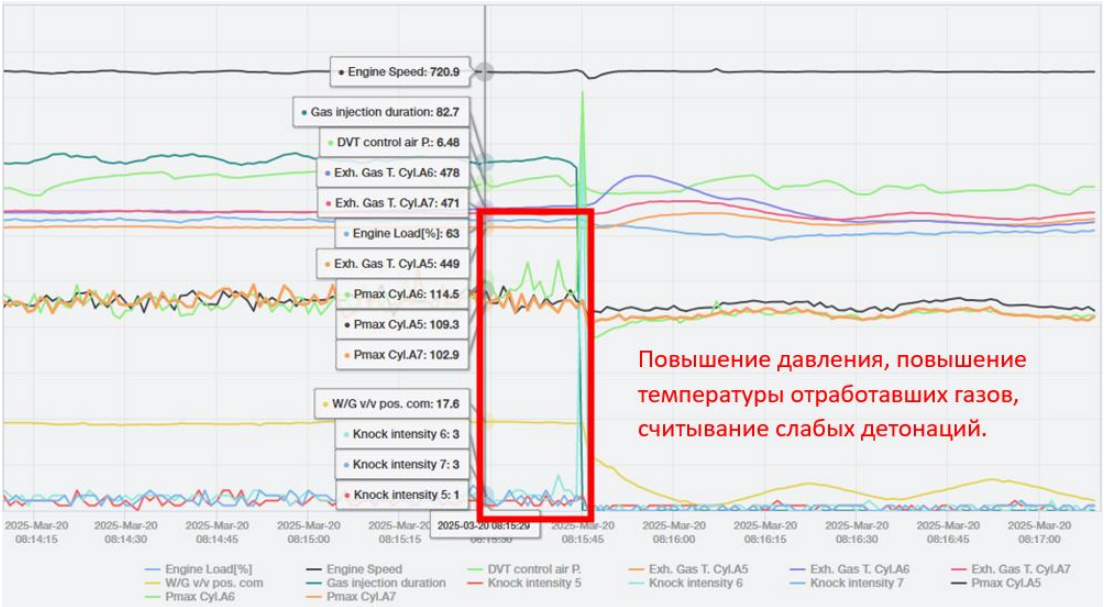

Рисунок 3 – Заблаговременное обнаружение предпосылок к возникновению детонации

Если корректировка угла опережения зажигания не повлияла на изменение тенденции к развитию детонационной опасности, двигатель осуществляет аварийный переход на дизельный режим (рисунок 4), во избежание критических нагрузок на ЦПГ.

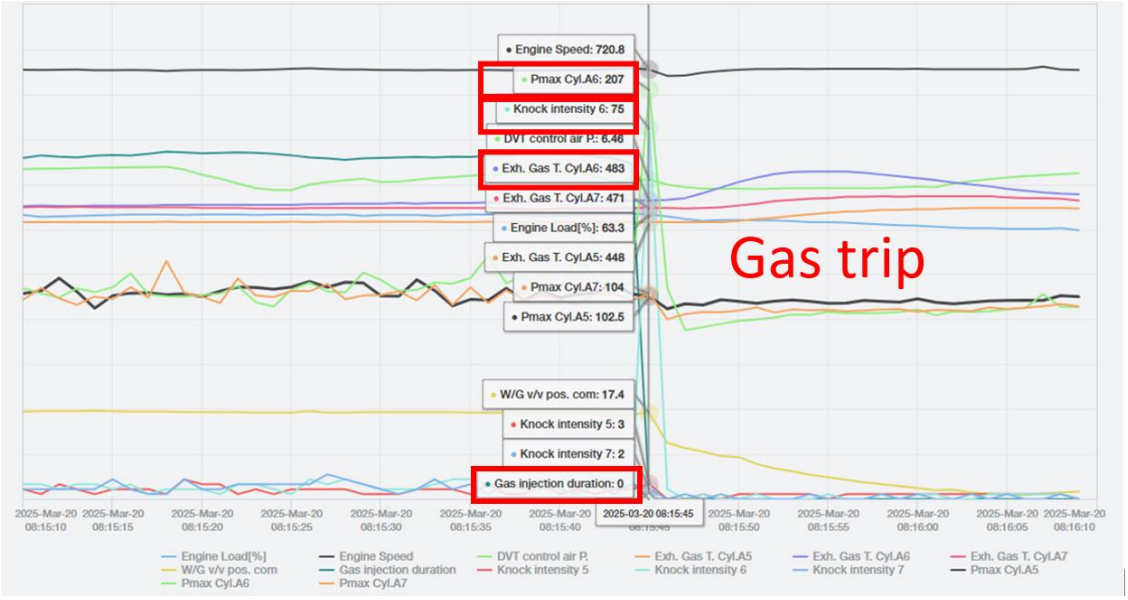

Рисунок 4 – Автоматический переход на дизельный режим работы

После перехода на дизельный режим параметры давления и температуры в камере сгорания нормировались (рисунок 5), 6-й цилиндр не показал аномальных изменений рабочих параметров, при работе на дизельном топливе.

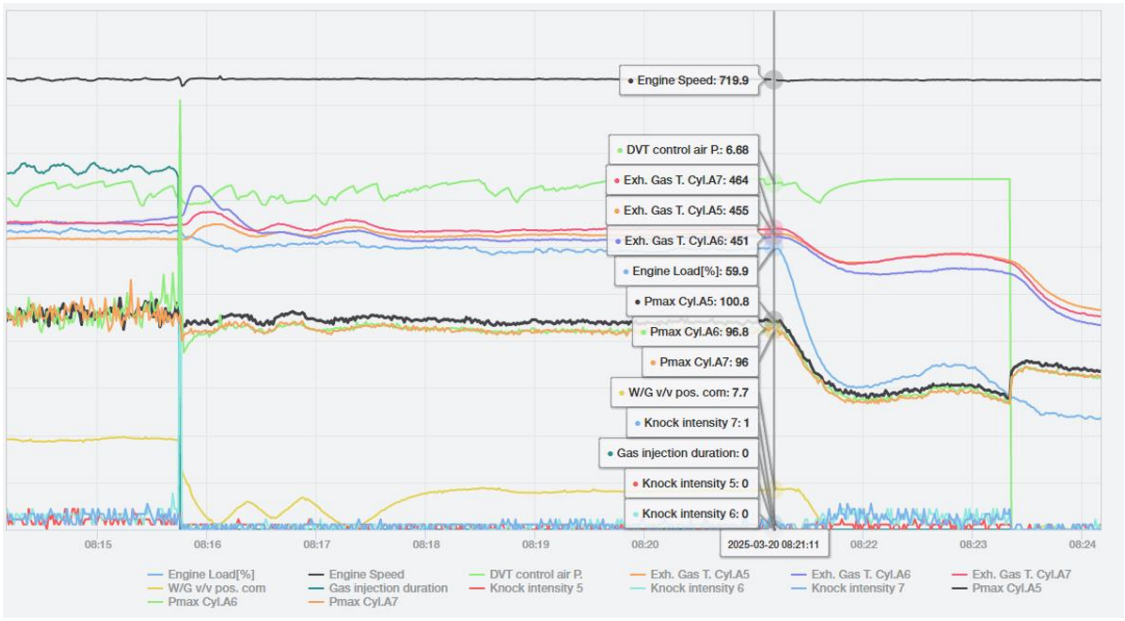

Рисунок 5 – Рабочие параметры двигателя после перехода на дизельное топливо

Основываясь на полученных графиках работы шестого цилиндра, можно сделать выводы что запальная форсунка работает исправно, так как отсутствуют какие-либо отличительные изменения по сравнению с другими цилиндрами. Чтобы убедиться, что неисправность заключается в системе подачи газа, двигатель был снова переведен на газ, как показано на рисунке 6.

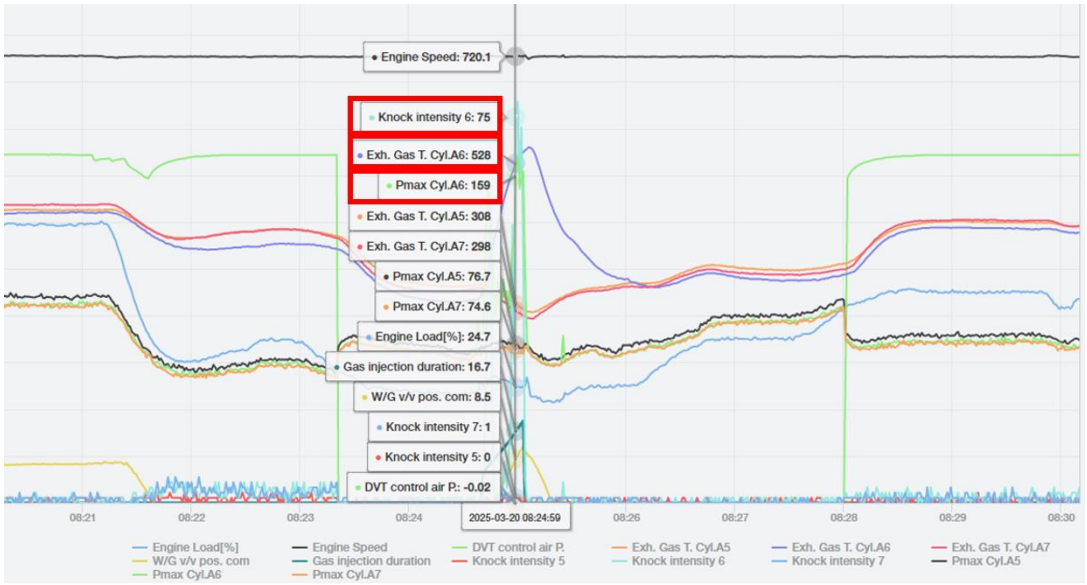

Рисунок 6 – Повторный переход на газовый режим

После повторного перехода на газ, интенсивность неконтролируемой детонации снова достигла предельных значений, температура отработавших газов и давление сгорания достигли максимально допустимых пределов, после чего, двигатель автоматически был переведен на дизельное топливо, что подтвердило наличие проблем, связанных с системой подачи газа.

Дальнейшее выявление неисправностей было направлено на исследование возможных дефектов впускного газового клапан SOGAV (рисунок 7.)

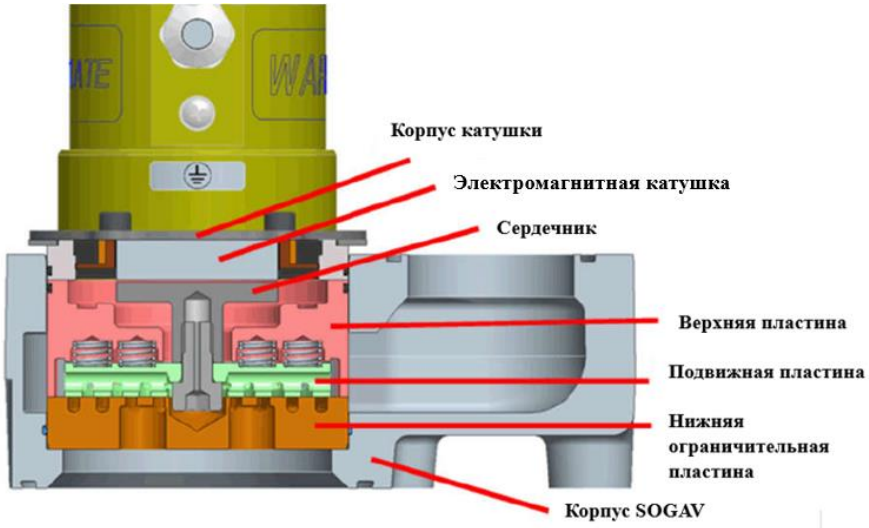

Рисунок 7 – Клапан SOGAV

После остановки двигателя, клапан SOGAV был снят и проверен на наличие дефектов. После тщательного осмотра была выявлена неисправность подвижной пластины (рисунок 8).

Рисунок 8 – Трещина подвижной пластины

Данная неисправность привела к неконтролируемой подаче газа в КС, что в свою очередь привело к обогащению топливовоздушной смеси и как следствие, вызвало детонацию в цилиндре. После замены SOGAV, рабочие параметры двигателя стабилизировались (рисунок 9).

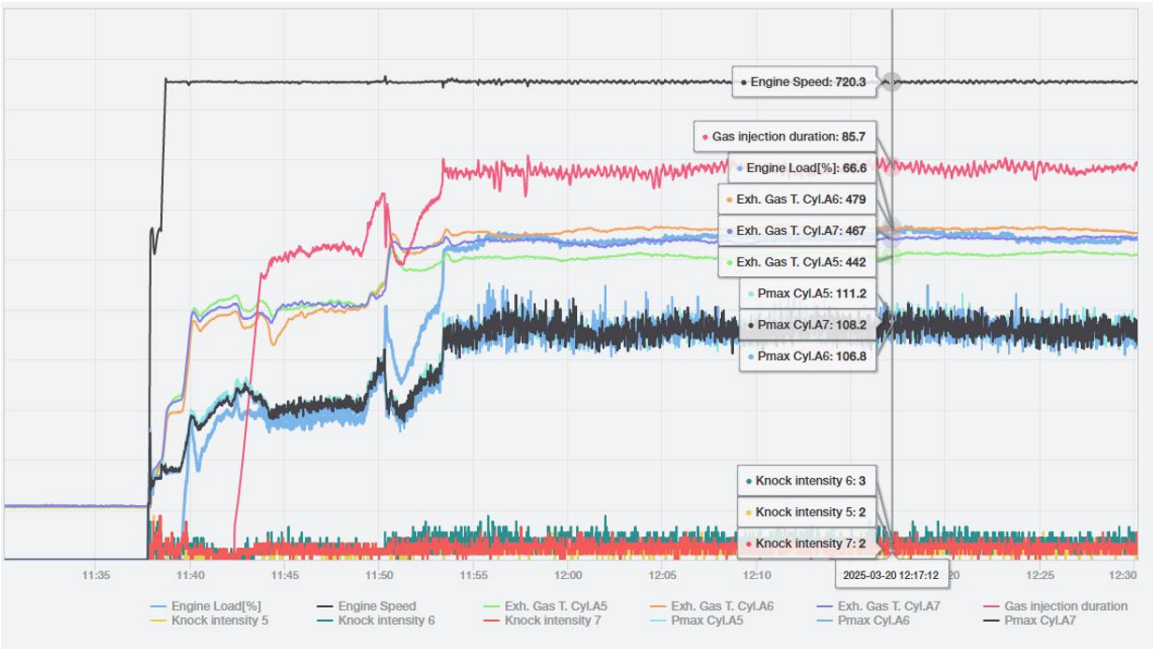

Рисунок 9 – Стабилизация рабочих параметров двигателя в газовом режиме после замены SOGAV

В проведенном анализе было установлено, что основной причиной детонации послужил дефект клапана SOGAV, вызвавший нарушение соотношения газ-воздух. Системой HiMSEN DFECS были эффективно выявлены предпосылки к образованию детонации и предприняты попытки по ее минимизации, но по причине неисправности впускного газового оборудования, двигатель во избежание повреждений, перешел в безопасный режим работы на дизельном топливе. Для предотвращения подобных отказов рекомендуется регулярная диагностика газовой системы, включая проверку герметичности и целостности клапанов.

Заключение и рекомендации по оптимизации работы газодизельного двигателя HHI 8H35DF

Оптимизация параметров впрыска запального топлива в газодизельных двигателях, работающих на сжиженном природном газе (СПГ), требует комплексного подхода, учитывающего взаимосвязь множества факторов. Основной задачей является обеспечение стабильного воспламенения газовоздушной смеси при минимальном количестве запального топлива, что достигается за счет точного управления моментом, продолжительностью и характеристиками впрыска. Ключевым аспектом оптимизации становится корректировка угла опережения впрыска, который должен динамически адаптироваться к изменяющимся условиям работы двигателя. Современные системы управления позволяют осуществлять такую адаптацию в реальном времени, учитывая данные от датчиков давления в цилиндре, температуры впускного воздуха, состава топливной смеси и текущей нагрузки на двигатель. Особое внимание уделяется поддержанию оптимального давления впрыска, что обеспечивает качественное распыливание топлива и формирование стабильного факела воспламенения.

Важным направлением оптимизации является совершенствование конструкции самих форсунок, где переход на пьезоэлектрические системы управления позволяет достичь большей точности и скорости срабатывания. Параллельно разрабатываются интеллектуальные алгоритмы управления, основанные на анализе вибрационных характеристик двигателя и акустических признаков детонации, что дает возможность оперативно корректировать параметры впрыска при первых признаках нестабильного сгорания. Практическая реализация таких систем требует установки дополнительных датчиков контроля процесса сгорания и модернизации программного обеспечения блока управления двигателем. Экспериментальные исследования показывают, что оптимальная стратегия впрыска должна предусматривать возможность многофазного впрыска запального топлива в течение одного рабочего цикла, что особенно эффективно при работе на переходных режимах. Многофазный впрыск подразумевает под собой трехфазную подачу запального топлива в камеру сгорания, а именно:

— Пилотный впрыск (20-30° до ВМТ). Первая фаза создает в камере сгорания несколько локальных очагов высокой температуры (1600-1800 К), что приводит к снижению энергии активации основной реакции окисления метана, а также формированию активных центров для последующего развития фронта пламени;

— Основной впрыск (2-5° до ВМТ) реализующий изохорный теплоподвод, обеспечивающий плавное сгорание метановоздушной смеси и обеспечивающий локальное охлаждение за счет теплоты испарения дизельного топлива и создания мелких очагов горения, которые быстро и равномерно сжигают метан;

— Пост впрыск (5-15° после ВМТ) обеспечивающий догорание несгоревших продуктов и снижение выбросов оксидов азота (NOx).

Дополнительный резерв для оптимизации заключается в учете степени износа двигателя и текущего состояния топливной аппаратуры, для чего разрабатываются адаптивные

алгоритмы самообучения системы управления. Особое значение приобретает регулярный мониторинг и техническое обслуживание форсунок, включая проверку герметичности, качества распыла и производительности. Современные диагностические системы позволяют автоматически корректировать параметры впрыска с учетом степени износа форсунок, компенсируя тем самым их естественную деградацию в процессе эксплуатации. Перспективным направлением является интеграция систем управления запальным впрыском с комплексными системами контроля качества газового топлива, что позволяет оперативно адаптировать параметры впрыска к изменяющимся характеристикам топливной смеси. Реализация указанных мер оптимизации позволяет существенно снизить вероятность возникновения детонационных процессов, повысить топливную экономичность и обеспечить стабильную работу двигателя на различных режимах эксплуатации. При этом достигается значительное увеличение ресурса двигателя за счет снижения термических и механических нагрузок на элементы цилиндропоршневой группы. Дальнейшее развитие систем управления запальным впрыском связано с внедрением более совершенных алгоритмов машинного обучения и нейросетевых технологий, способных анализировать комплекс параметров работы двигателя и прогнозировать оптимальные режимы впрыска с учетом множества взаимосвязанных факторов.

Список литературы:

1. Возницкий, И. В., Пунда, А. С. Судовые двигатели внутреннего сгорания / И. В. Возницкий, А. С. Пунда — 2 том. — Санкт-Петербург: СПБ Моркнига, 2008 — 470 с.

2.Б.П. Башуров, А.А. Иванченко, В.В. Шарик. Оценка функциональной надежности элементов цилиндро-поршневой группы судовых дизелей на основе статистических исследований : Морские интеллектуальные технологии №2 том 4, СПб, 2021г.

3. Heywood J. B.* Internal Combustion Engine Fundamentals / J. B. Heywood. — 2nd ed. — New York : McGraw-Hill Education, 2018. — 1056 p

4. Хайвуд, Дж. Б. Основы двигателей внутреннего сгорания : пер. с англ. / Дж. Б. Хайвуд. — 2-е изд. — Москва : McGraw-Hill, 2018. — 930 с. — ISBN 978-0-07-100499-2.

5. Вэй Л. Нестабильность сгорания и детонационные характеристики в двухтопливных двигателях на СПГ и дизеле / Л. Вэй, П. Генг, Л. Лян // Fuel. — 2023. — Т. 332. — С. 126112. — DOI: 10.1016/j.fuel.2022.126112.

6. Zhao H.* Combustion and emission characteristics of a natural gas-diesel dual-fuel engine / H. Zhao, W. Wang, B. Zhang // Fuel. — 2020. — Vol. 263. — P. 116665.