

(19)



Евразийское  
патентное  
ведомство

(21) 202491680 (13) A1

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки  
2024.10.15(22) Дата подачи заявки  
2023.02.10(51) Int. Cl. *F02D 41/00* (2006.01)  
*F02B 5/00* (2006.01)  
*F02D 19/02* (2006.01)  
*F02M 25/022* (2006.01)  
*F02M 25/03* (2006.01)  
*F02B 47/02* (2006.01)

## (54) ЧЕТЫРЕХТАКТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА ВОДОРОДНОМ ТОПЛИВЕ

(31) LU501441; LU501822

(32) 2022.02.10; 2022.04.08

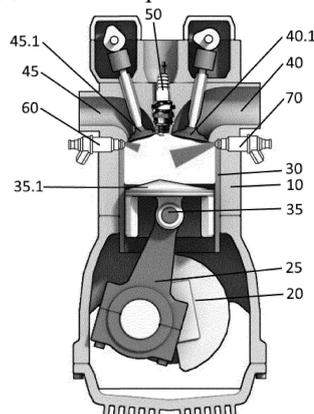
(33) LU

(86) PCT/EP2023/053310

(87) WO 2023/152295 2023.08.17

(71) Заявитель:  
ДИ-ЭМ-ЭЙ ТЕК С.А Р.Л. (LU)(72) Изобретатель:  
Буви Жак (BE)(74) Представитель:  
Веселицкий М.Б., Кузенкова Н.В.,  
Каксис Р.А., Белоусов Ю.В., Куликов  
А.В., Кузнецова Е.В., Соколов Р.А.,  
Кузнецова Т.В. (RU)

(57) Поршневой четырехтактный двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе, включающий в себя корпус (10) двигателя, коленчатый вал (20), который выполнен с возможностью вращения вокруг оси коленчатого вала, цилиндр (30), расположенный внутри корпуса (10) двигателя, поршень (35), расположенный внутри цилиндра и совершающий возвратно-поступательное перемещение вдоль оси возвратно-поступательного перемещения между удаленным от коленчатого вала (20) положением верхней мертвой точки (ВМТ) и приближенным к коленчатому валу (20) положением нижней мертвой точки (НМТ) и функционально соединенный с коленчатым валом так, что поршень (35) при возвратно-поступательном перемещении сообщает коленчатому валу вращательное перемещение, камеру (37) сгорания, заданную внутри цилиндра (30) между корпусом (10) двигателя и головкой (35) поршня напротив коленчатого вала (20), впускной клапан (40.1), выпускной клапан (45.1), водородный инжектор (60), выполненный для непосредственного впрыска водорода в камеру (37) сгорания, водный инжектор (70), выполненный для непосредственного впрыска воды в камеру (37) сгорания, искровую или калильную свечу (50), а также блок управления двигателем, выполненный для управления фазами распределения и количеством впрыска водорода и впрыска воды, причем блок управления двигателем выполнен для впрыска в камеру сгорания первого количества водорода на первой фазе распределения от 20° до ВМТ во время такта сжатия до 20° после ВМТ, для впрыска в камеру сгорания второго количества воды на второй фазе распределения от 110 до 90° до ВМТ во время такта сжатия, и для впрыска в камеру сгорания третьего количества водорода на третьей фазе распределения от 180 до 100° до ВМТ во время такта сжатия.



A1

202491680

202491680

A1

## ЧЕТЫРЕХТАКТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА ВОДОРОДНОМ ТОПЛИВЕ

5

### Область техники

Настоящее изобретение, в целом, относится к четырехтактным двигателям внутреннего сгорания, а прежде всего к четырехтактным двигателям внутреннего сгорания на водородном топливе с повышенной эффективностью, низким уровнем загрязнения и высоким крутящим моментом, а также к способу их эксплуатации.

### Уровень техники

Известны четырехтактные двигатели внутреннего сгорания, которые обычно состоят из корпуса двигателя, коленчатого вала, который выполнен с возможностью вращения вокруг оси коленчатого вала, одного или нескольких цилиндров, которые расположены внутри корпуса двигателя, поршня, который расположен внутри каждого цилиндра с возможностью перемещения вдоль оси возвратно-поступательного перемещения между удаленным от коленчатого вала положением верхней мертвой точки (ВМТ), и приближенным к коленчатому валу положением нижней мертвой точки (НМТ). Совершающий возвратно-поступательное перемещение поршень функционально соединен с коленчатым валом так, что он придает коленчатому валу вращательное перемещение. Кроме того, двигатель включает в себя камеру сгорания, расположенную внутри цилиндра между корпусом двигателя и противоположной коленчатому валу головкой поршня, по меньшей мере по одному впускному клапану и по одному выпускному клапану на цилиндр, средства для подачи топлива в камеру сгорания, по меньшей мере по одной искровой свече на цилиндр, если двигатель основан на искровом зажигании топливоздушная смеси, и, как правило, блок управления двигателем для управления работой двигателя.

Функционирование четырехтактных двигателей с непосредственным впрыском топлива происходит в ходе повторяющихся циклов, каждый из которых состоит из четырех последовательных тактов, при этом такты представлены следующим образом:

Такт впуска: поршень начинает перемещение вниз от верхней мертвой точки к нижней мертвой точке, происходит открывание впускного клапана, и воздух поступает в камеру сгорания.

5 Такт сжатия: поршень перемещается из нижней мертвой точки в верхнюю мертвую точку и сжимает воздух внутри цилиндра, при этом давление и температура в камере сгорания повышаются.

10 Такт сгорания (рабочий такт): как правило, в конце такта сжатия (до того, как поршень достигнет верхней мертвой точки) или в самом начале такта сгорания топливные инжекторы начинают впрыск топлива в камеру сгорания. В определенный момент топливо либо самопроизвольно воспламеняется (воспламенение от сжатия), либо поджигается искрой от искровой свечи (искровое зажигание). Сгорание топливно-воздушной смеси создает давление на головку поршня и толкает поршень вниз, передавая тем самым энергию

15 Такт выпуска: после того как поршень достигает дна цилиндра (нижней мертвой точки), поршень начинает перемещение вверх, происходит открывание выпускного клапана, и под действием поршня выхлопные газы покидают камеру сгорания, направляясь в выпускную систему и, наконец, в атмосферу.

20 Такие двигатели в основном работают на жидком или газообразном углеводородном топливе, но в связи с ужесточением относящихся к экологии и нежелательному углеродному следу правил, водород представляется очевидным и изящным решением, позволяющим полностью избежать выбросов оксидов углерода и несгоревших углеводородов.

25 Однако замена углеводородного топлива водородом в качестве топлива не является тривиальной задачей. Водород обладает многими свойствами, которые очевидным образом отличают его от углеводородных топлив, даже по сравнению с такими, казалось бы, похожими газообразными углеводородными топливами, как метан или пропан.

30 Во-первых, водород имеет по сравнению с прочими химическими видами топлива самое высокое соотношение массы и энергии, а по соотношению массы и энергоёмкости он превосходит обычное бензиновое топливо примерно в 3 раза, спирт - в 5-6 раз, а метан и пропан - в 2,5 раза.

Во-вторых, водород имеет очень высокую скорость сгорания или скорость распространения пламени в камере сгорания двигателя, которая примерно в 6

раз выше, чем у бензина. При стехиометрическом соотношении воздуха и топлива скорость распространения пламени водорода почти на порядок выше (быстрее), чем у бензина.

5 В-третьих, водород имеет широкие пределы воспламеняемости по сравнению с другими видами топлива – от 4 до 75% по объему при 25 °С и давлении 1 бар по сравнению, например, с 1,4-2,3% по объему в воздухе в случае бензина.

10 В-четвертых, водород имеет очень низкую энергию воспламенения. Минимальная энергия воспламенения водородно-воздушной смеси составляет всего 0,017 мДж, в то время как у других горючих газов, таких как бензин, метан или пропан, она обычно составляет порядка 0,1 мДж.

15 В-пятых, водород имеет относительно высокую температуру самовоспламенения - примерно 585°С по сравнению примерно с 350°С для бензина. Несмотря на низкую энергию воспламенения, этот фактор затрудняет воспламенение водородно-воздушной смеси только за счет тепла, без дополнительного источника зажигания.

В-шестых, водород обладает очень высоким показателем молекулярной диффузии, что означает, что его способность рассеиваться в воздухе значительно выше, чем у бензина.

20 В-седьмых, водород имеет небольшую дистанцию гашения - примерно 0,6 мм по сравнению с 2,0 мм для бензина. Таким образом, расстояние от внутренней стенки цилиндра, на которой гаснет пламя сгорания, является значительно меньшим, что может оказывать негативное влияние на пленку смазки на стенках цилиндра и повышать опасность возникновения обратного удара.

25 В-восьмых, водород оказывает хорошо известное и нежелательное воздействие на механические свойства широко используемых металлов, таких как железо и сталь, обычно называемое эффектом водородного охрупчивания, что приводит к снижению пластичности и фактического напряжения при разрушении этих металлов.

30 Хотя, по меньшей мере, некоторые из этих свойств представляются на первый взгляд желательными и выгодными, они, несомненно, создают трудности при, казалось бы, тривиальной замене углеводородного топлива водородом.

Это тем более верно, что некоторые из этих свойств, а именно первые шесть, приводят к значительному повышению температуры сгорания, что, в свою очередь, увеличивает нежелательное образование в процессе сгорания оксидов азота. Кроме того, дополнительные трудности при замене  
5 углеводородного топлива водородом создают более высокие температуры сгорания в сочетании с более короткой дистанцией гашения и эффектом охрупчивания.

#### Техническая задача

Задачей настоящего изобретения является создание четырехтактного  
10 двигателя внутреннего сгорания, который, прежде всего, приспособлен к использованию водорода в качестве топлива для генерирования мощности посредством обеспечения возможности более эффективной работы без ущерба для его высокого потенциала в качестве экологически чистого решения, прежде  
15 всего в отношении выбросов оксидов азота. Другой задачей является обеспечение соответствующего способа эксплуатации такого двигателя с целью повышения как его производительности, так и улучшения его экологических преимуществ.

#### Общее описание изобретения

Для преодоления, по меньшей мере, некоторых из вышеупомянутых  
20 проблем и достижения поставленной цели в настоящем изобретении предложен, в первом аспекте, поршневой четырехтактный двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе, включающий в себя корпус двигателя, коленчатый вал, который выполнен с возможностью вращения вокруг  
25 оси коленчатого вала, цилиндр, расположенный внутри корпуса двигателя, поршень, расположенный внутри цилиндра и совершающий возвратно-поступательное перемещение вдоль оси возвратно-поступательного перемещения между удаленным от коленчатого вала положением верхней  
30 мертвой точки (ВМТ) и приближенным к коленчатому валу положением нижней мертвой точки (НМТ) и функционально соединенный с коленчатым валом так, что поршень при возвратно-поступательном перемещении сообщает коленчатому валу вращательное перемещение, камеру сгорания, заданную  
внутри цилиндра между корпусом двигателя и головкой поршня напротив коленчатого вала, впускной клапан, выпускной клапан, водородный инжектор, выполненный для непосредственного впрыска водорода в камеру сгорания,

водный инжектор, выполненный для непосредственного впрыска воды в камеру сгорания, искровую или калильную свечу, а также блок управления двигателем, выполненный для управления фазами распределения и количеством впрыска водорода и впрыска воды, причем блок управления двигателем выполнен для  
5 впрыска в камеру сгорания третьего количества водорода на третьей фазе распределения от  $180^\circ$  до  $100^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия, впрыска в камеру сгорания первого количества водорода на первой фазе распределения от  $20^\circ$  до ВМТ во время такта сжатия до  $20^\circ$  после ВМТ и для впрыска второго количества (жидкой или газообразной) воды в камеру сгорания на второй фазе  
10 распределения от  $110^\circ$  до  $90^\circ$ , предпочтительно от менее чем  $110^\circ$  до более чем  $90^\circ$ , например от  $107,5^\circ$  до  $92,5^\circ$  или даже от  $105^\circ$  до  $95^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия.

Следует предварительно отметить, что в настоящем контексте порядковые номера «первый», «второй», «третий» и «четвертый» использованы  
15 исключительно для обозначения терминов «количество» и «фаза распределения» и для однозначной связи соответствующего «количества» впрыскиваемого материала, то есть водорода или воды, с «фазой распределения» его впрыска. Таким образом, «первое количество» подлежит впрыску на «первой фазе распределения», «второе количество» подлежит впрыску на «второй фазе  
20 распределения» и так далее. Таким образом, порядковые числительные не подразумевают каких-либо других взаимных отношений по характеру, величине, важности, хронологическому порядку и тому подобному. Таким образом, общее количество водорода за цикл равно сумме впрыснутых на первой и третьей фазах распределения первого количества водорода и третьего количества  
25 водорода, тогда как общее количество впрыснутой за цикл воды равно впрыснутому на второй фазе распределения второму количеству воды, или, в описанных ниже более подробно некоторых предпочтительных вариантах осуществления, сумме впрыснутых на протяжении второй и четвертой фаз распределения второго количества воды и четвертого количества воды.

30 Изобретатели обнаружили, что впрыск жидкой воды во время такта сжатия на фазе распределения примерно от  $110^\circ$  до  $90^\circ$  перед ВМТ позволяет преодолевать некоторые возникающие при использовании водорода проблемы и влияние его упомянутых выше особых свойств. В самом деле, введение некоторого количества воды в камеру сгорания обеспечивает возможность не

только снижения температуры в камере сгорания во время сжатия, но также и снижения температуры во время сгорания, тем самым позволяя уменьшать образование нежелательных оксидов азота. Фактически было обнаружено, что впрыск воды, даже задолго до инициирования сгорания посредством искровой или калильной свечи, и также задолго до впрыска первого количества водорода, позволяет, по меньшей мере, в некоторой степени контролировать последствия высокого отношения массы к энергии и весьма высокой скорости сгорания водорода. Такой относительно ранний впрыск воды в камеру сгорания, однако, не только является выгодным с точки зрения, по меньшей мере, частичного замедления горения водорода, но и может быть осуществлен энергетически выгодным образом. В самом деле, на фазе распределения примерно от  $110^\circ$  до  $90^\circ$  до ВМТ давление (и температура) внутри цилиндра является еще относительно низкой, что означает, что для впрыска воды на этой стадии не требуются ни форсунки высокого давления, ни дорогостоящие и энергозатратные насосы высокого давления. Таким образом, вода обычно может быть впрыснута в жидком виде при температуре значительно ниже  $150^\circ\text{C}$ , предпочтительно ниже примерно  $100^\circ\text{C}$ , например ниже  $70^\circ\text{C}$ , ниже  $50^\circ\text{C}$  или даже при температуре окружающей среды.

В общем случае, при впрыске воды в камеру сгорания двигателя внутреннего сгорания существует опасность недостаточно быстрого испарения воды и ее оседания на стенках цилиндра, что может привести к нарушению целостности смазочной пленки на стенках цилиндра и к разжижению смазки, что является особо вредным для работающего на водороде двигателя вследствие упомянутых выше эффекта водородного охрупчивания и небольшой дистанции гашения. Изобретатели обнаружили, что путем впрыска относительно небольшого (третьего) количества водорода на фазе распределения до впрыска (второго количества) жидкой воды этот негативный эффект осаждения воды может быть в значительной степени взят под контроль или даже предотвращен. Предполагается, что этот благоприятный эффект обусловлен упомянутым выше весьма высоким показателем молекулярной диффузии водорода, что способствует диспергированию воды и тем самым улучшает ее испарение, что, в свою очередь, снижает опасность вредного осаждения на стенках цилиндра. Для достижения указанного эффекта (третье количество) водорода может быть впрыснута на (третьей) фазе распределения от  $180^\circ$  до  $100^\circ$  перед ВМТ во время

такта сжатия, наиболее предпочтительно, не позднее, чем перед началом впрыска второго количества воды.

Также было обнаружено, что выгодное диспергирующее действие водорода на впрыск воды может быть достигнуто при использовании лишь относительно  
5 небольшого количества водорода в качестве третьего количества. В самом деле, предпочтительным является, когда блок управления двигателем выполнен для управления третьим количеством водорода так, что он составляет 5-50 % по  
10 массе, предпочтительно 10-45 % по массе, и прежде всего 15-40 % по массе, от общего количества водорода, причем общее количество водорода (за цикл) представляет собой сумму третьего количества и первого количества водорода.

Хотя ранний впрыск эффективного количества воды, скорее всего, может привести к разрушению смазочной пленки или разбавлению смазки, поскольку температура внутри цилиндра в это время является слишком низкой для  
15 обеспечения испарения воды, изобретатели неожиданным образом обнаружили, что это вовсе не исключает впрыск воды в эти ранние моменты времени при работе в соответствии с настоящим изобретением. В самом деле, благодаря раннему впрыску третьего количества водорода и обусловленному его весьма  
20 высоким показателем молекулярной диффузии диспергирующему действию впрыск относительно небольшого количества воды может быть осуществлен также и очень рано во время такта сжатия, что обеспечивает возможность введения дополнительного количества воды в камеру сгорания без опасности возникновения проблем со смазыванием. Таким образом, в предпочтительных вариантах осуществления блок управления двигателем выполнен для  
25 последующего впрыска в камеру сгорания четвертого количества воды на четвертой фазе распределения от  $180^\circ$  до  $110^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия. Впрыск третьего количества водорода может быть начат до, одновременно или после впрыска четвертого количества воды, то есть может происходить  
30 перекрытие по времени впрыска четвертого количества воды с впрыском третьего количества водорода. Предпочтительно, впрыск четвертого количества воды происходит на четвертой фазе распределения, что в самом раннем случае совпадает по времени с впрыском третьего количества водорода.

Предпочтительно, блок управления двигателем выполнен для управления четвертым количеством воды, который составляет 0,5-5,0 % по массе, предпочтительно 0,75-4,0 % по массе, прежде всего 0,85-3,0 % по массе, от

общего количества воды, причем общее количество воды за цикл представляет собой сумму второго количества воды и четвертого количества воды.

Помимо уже упомянутых выше предпочтительных признаков и эффектов настоящего изобретения, еще одним его главным преимуществом является тот факт, что присутствие добавленной воды уменьшает детонацию, что, в свою очередь, позволяет эксплуатировать двигатель внутреннего сгорания при значениях лямбды (то есть, коэффициента эквивалентности воздуха к топливу), которые значительно ниже тех, которые обычно могут быть использованы для работающих на водороде двигателей внутреннего сгорания. В самом деле, ввиду, прежде всего, высокого отношения массы к энергии и очень высокой скорости сгорания водорода, работающие на водородном топливе двигатели обычно должны работать в условиях крайне обедненной смеси, как для обеспечения контроля над температурой двигателя, так и для снижения образования оксидов азота. Как следствие, обычные, работающие на водородном топливе двигатели не могут работать с высоким термическим коэффициентом полезного действия, например столь же высоким, как у дизельных двигателей.

Эффективный впрыск воды согласно настоящему изобретению, будь то впрыск только второго количества воды на второй фазе распределения или дополнительный ранний впрыск четвертого количества воды на четвертой фазе распределения, позволяет работать при значениях лямбда, которые являются значительно меньшими, чем значения лямбда в обычных двигателях внутреннего сгорания на водородном топливе, тем самым обеспечивая возможность работы с более высоким коэффициентом полезного действия. Как следствие, блок управления двигателем обычно выполнен для управления общим количеством водорода за цикл и общим количеством жидкой воды за цикл (последний представляет собой либо только второе количество воды, если нет впрыска четвертого количества воды, либо сумму второго и четвертого количеств воды) для получения значения лямбды между 1,5 и 2,5, предпочтительно между 1,6 и 2,4, более предпочтительно между 1,7 и 2,3.

Таким образом, эффективный впрыск воды согласно настоящему изобретению также устраняет или, по меньшей мере, уменьшает необходимость в дополнительном дорогостоящем и сложном оборудовании, таком как клапаны рециркуляции отработавших газов (РОГ) или усовершенствованные турбокомпрессоры.

Кроме того, было обнаружено, что массовое соотношение воды и водорода, как ни странно, в значительной степени не зависит от частоты вращения двигателя, и что преимущества изобретения, такие как более эффективная работа, меньшее образование оксидов азота, меньшая нагрузка на двигатель и так далее, могут быть получены не только для стационарных двигателей, работающих только при определенных значениях числа оборотов в минуту, например в электрогенераторах, но также присутствуют при любом другом типе применения, например, прежде всего, для автомобильных двигателей. Предпочтительно, блок управления двигателем выполнен для управления общим количеством водорода и общим количеством воды для получения массового отношения воды к водороду в диапазоне 1,0-2,0, предпочтительно 1,3-1,9, более предпочтительно 1,5-1,7, например примерно 1,6.

В особо предпочтительных вариантах осуществления поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе согласно настоящему изобретению первая фаза распределения находится от  $15^\circ$  до ВМТ во время такта сжатия до  $15^\circ$  после ВМТ и/или вторая фаза распределения находится от  $105^\circ$  до  $95^\circ$ , предпочтительно приблизительно  $100^\circ$ , перед верхней мертвой точкой (ВМТ) во время такта сжатия и/или третья фаза распределения впрыска водорода простирается от  $175^\circ$  до  $120^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия и/или, если применимо, четвертая фаза распределения находится от  $175^\circ$  до  $120^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия.

Добавление превращающейся в газ жидкой воды позволяет снизить температуру, что, в свою очередь, позволяет увеличить фактическую степень сжатия, то есть соотношение между объемом цилиндра и камеры сгорания в двигателе внутреннего сгорания при ее максимальном и минимальном значениях. В предпочтительных поршневых четырехтактных двигателях внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе фактическая степень сжатия двигателя составляет от 12,9:1 до 17:1, предпочтительно от 13,4:1 до 16,5:1, более предпочтительно от 13,9:1 до 16:1.

Во втором своем аспекте изобретение аналогичным образом предлагает способ эксплуатации поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе, предпочтительно двигателя согласно первому аспекту, включающего в себя корпус двигателя,

коленчатый вал, который выполнен с возможностью вращения вокруг оси коленчатого вала, цилиндр, расположенный внутри корпуса двигателя, поршень, расположенный внутри цилиндра и совершающий возвратно-поступательное перемещение вдоль оси возвратно-поступательного перемещения между удаленным от коленчатого вала положением верхней мертвой точки (ВМТ) и приближенным к коленчатому валу положением нижней мертвой точки (НМТ) и функционально соединенный с коленчатым валом так, что поршень при возвратно-поступательном перемещении сообщает коленчатому валу вращательное перемещение, камеру сгорания, заданную внутри цилиндра между корпусом двигателя и головкой поршня напротив коленчатого вала, впускной клапан, выпускной клапан, водородный инжектор, выполненный для непосредственного впрыска водорода в камеру сгорания, водный инжектор, выполненный для непосредственного впрыска воды в камеру сгорания, искровую или калильную свечу, а также блок управления двигателем, выполненный для осуществления шагов способа, причем способ включает в себя на каждом четырехтактном цикле шаги:

А) впрыска в камеру сгорания посредством водородного инжектора третьего количества водорода на третьей фазе распределения от  $180^\circ$  до  $100^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия,

Б) впрыска в камеру сгорания посредством водородного инжектора первого количества водорода на первой фазе распределения от  $20^\circ$  до ВМТ во время такта сжатия до  $20^\circ$  после ВМТ, и

В) впрыска в камеру сгорания посредством водного инжектора второго количества воды на второй фазе распределения от  $110^\circ$  до  $90^\circ$ , предпочтительно от менее  $110^\circ$  до более  $90^\circ$ , например от  $107,5^\circ$  до  $92,5^\circ$  или даже от  $105^\circ$  до  $95^\circ$ , перед ВМТ во время такта сжатия.

В настоящем способе эксплуатации поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе третьим количеством водорода на шаге А), предпочтительно, управляют так, что он составляет от 5 до 50 % по массе от общего количества водорода, причем общее количество водорода представляет собой сумму третьего количества и первого количества водорода.

Предпочтительно, способ дополнительно включает в себя шаг:

Г) впрыска в камеру сгорания посредством водного инжектора четвертого количества воды на фазе распределения от  $180^\circ$  до  $110^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия.

5 Четвертым количеством воды, предпочтительно, управляют так, что он составляет от 0,5 до 5 % по массе от общего количества воды, причем общее количество воды представляет собой сумму второго количества воды и четвертого количества воды.

10 В особо предпочтительных вариантах осуществления общим количеством водорода и вторым или общим количеством воды управляют для получения значения лямбда в диапазоне 1,5-2,5, предпочтительно 1,6-2,4, более предпочтительно 1,7-2,3, причем значение лямбда представляет собой коэффициент эквивалентности воздуха к топливу.

15 В способе эксплуатации поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе общим количеством водорода и общим количеством воды, предпочтительно, управляют для получения массового отношения воды к водороду, составляющего 1,0-2,0, более предпочтительно 1,3-1,9, наиболее предпочтительно 1,5-1,7, прежде всего примерно 1,6.

20 В рамках способа эксплуатации поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе могут быть предусмотрены такие регулировки, что на шаге А) третью фазу распределения впрыска водорода задают от  $180^\circ$  до  $100^\circ$ , предпочтительно от  $175^\circ$  до  $120^\circ$ , до ВМТ во время такта сжатия и/или, что на шаге В) первую фазу распределения задают от  $15^\circ$  до ВМТ во время такта сжатия до  $15^\circ$  после ВМТ и/или, что на шаге Б) вторую фазу распределения задают от  $105^\circ$  до  $95^\circ$ , предпочтительно приблизительно  $100^\circ$ , до верхней мертвой точки (ВМТ) во время такта сжатия и/или, что четвертую фазу распределения, если применимо, задают от  $180^\circ$  до  $110^\circ$ , предпочтительно от  $175^\circ$  до  $120^\circ$  до ВМТ, во время такта сжатия.

30 Фазы распределения двигателя внутреннего сгорания в целом, а прежде всего фазы распределения впрыска, как указано в настоящем документе, обозначены углом поворота коленчатого вала, выраженным относительно положения совершающего возвратно-поступательное перемещение в цилиндре

двигателя поршня, при необходимости, относительно соответствующего такта рабочего цикла. Выражения «верхняя мертвая точка» или «ВМТ» и «нижняя мертвая точка» или «НМТ» являются общеизвестными выражениями в области двигателей внутреннего сгорания и относятся к обоим конечным положениям совершающего вдоль оси возвратно-поступательного перемещения возвратно-поступательное перемещение поршня или, прежде всего, верхней части поршня в цилиндре. Верхняя мертвая точка является наиболее удаленным от коленчатого вала положением поршня, в то время как нижняя мертвая точка является наиболее приближенным к коленчатому валу его положением. Таким образом, положения вдоль оси возвратно-поступательного перемещения обычно указывают в градусах ( $^{\circ}$ ) от любой мертвой точки относительно коленчатого вала и в направлении его вращения. Зачастую перед вышеприведенными выражениями стоит предлог «после» или «до». Например: « $110^{\circ}$  до верхней мертвой точки» (сокращенно  $110^{\circ}$  до ВМТ или  $110^{\circ}$  ДВМТ) означает, что верхняя часть поршня находится в положении вдоль оси возвратно-поступательного перемещения, которое соответствует углу поворота коленчатого вала на  $-110^{\circ}$  относительно верхней мертвой точки. Обозначение «диапазон от  $20^{\circ}$  до  $+20^{\circ}$  от верхней мертвой точки» эквивалентно «от  $20^{\circ}$  до верхней мертвой точки до  $20^{\circ}$  после верхней мертвой точки» или «от  $20^{\circ}$  до ВМТ до  $20^{\circ}$  после ВМТ».

Кроме того, указания на фазы распределения впрыска в данном контексте означают начало соответствующего впрыска (впрысков). В самом деле, хотя продолжительности впрысков по необходимости являются скоротечными, они неизбежно требуют некоторого времени, в течение которого поршень продолжает свое перемещение в цилиндре.

Впускной клапан(ы) и выпускной клапан(ы) могут быть представлены любым подходящим типом клапана, предпочтительно они независимо друг от друга могут быть представлены тарельчатыми клапанами, используемыми почти во всех четырехтактных двигателях, золотниками или дисковыми поворотными клапанами, которые могут быть приведены в действие либо посредством двигателя как такового (двигатель, таким образом, является приводом), например посредством распределительных валов, либо посредством отдельных приводов, например пневматических, гидравлических или электрических приводов. Например, выполненная в виде золотника или поворотного диска

клапанная система может выгодно отличаться тем, что позволяет задавать время открытия и закрытия выпускного клапана в нижней мертвой точке и открывать выпускной клапан перед закрытием выпускного клапана.

Двигатель внутреннего сгорания согласно изобретению может  
5 дополнительно включать в себя водный бак в качестве источника воды для  
питания водного инжектора или инжекторов, а также конденсатный узел,  
расположенный ниже по потоку от выпускного клапана (клапанов). Этот  
конденсатный узел, например теплообменник, может быть предусмотрен для  
10 конденсации пара из выхлопных газов в воду, которая затем может быть подана  
по трубопроводам в водный бак. Такая рециркуляция используемой для  
производства пара воды представляет особый интерес для мобильных  
применений, где количество перевозимой воды обычно является ограниченным.  
Кроме того, повторное использование воды также сокращает число ее  
дозаправок. Также могут быть предусмотрены фильтрующие средства для  
15 фильтрации отработанного пара. Водный бак, предпочтительно, предназначен  
как для заполнения водой с помощью обычной заливной горловины, так и для  
заполнения отработанным конденсатом.

Очевидно, двигатель внутреннего сгорания согласно изобретению может  
состоять из нескольких цилиндров. Кроме того, каждый из этих цилиндров  
20 может включать в себя несколько водных инжекторов, которые предпочтительно  
распределены по периметру камеры сгорания. Водные инжекторы могут быть  
размещены в любом подходящем, расположенном внутри камеры сгорания месте  
цилиндра.

Все приведенные в настоящем документе явные значения следует понимать  
25 как примерные значения, если явно не указано иное. Таким образом, каждое из  
указанных явных значений следует понимать как охватывающее собой диапазон  
значений от 10% ниже до 10% выше указанного значения. Явные значения,  
которым предшествует термин «примерно», «приблизительно» или тому  
подобное, следует понимать как охватывающие собой диапазон значений от 20  
30 % ниже до 20 % выше указанных значений.

Краткое описание чертежей

Предпочтительные варианты осуществления изобретения далее описаны, в  
качестве примера, с отсылками на сопроводительные чертежи, на которых:

Фиг. 1-3 представляют собой схематические виды в частичном поперечном сечении одного из вариантов осуществления поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе в различных фазах распределения во время такта сжатия, причем на фиг. 1 5 показан двигатель в фазе распределения  $180^\circ$  перед ВМТ (то есть, в момент НМТ), на фиг. 2 показан двигатель в фазе распределения от  $110^\circ$  до  $90^\circ$  перед ВМТ и на фиг. 3 показан двигатель в фазе распределения приблизительно  $20^\circ$  перед ВМТ.

Другие подробности и преимущества настоящего изобретения станут 10 очевидны из последующего подробного описания нескольких неограничивающих вариантов осуществления с отсылкой на прилагаемые чертежи.

Описание предпочтительных вариантов осуществления

Фиг. 1-3 представляют собой схематические изображения одного из 15 вариантов осуществления поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе согласно изобретению. Одинаковые ссылочные обозначения на этих чертежах обозначают идентичные признаки.

Двигатель внутреннего сгорания имеет корпус 10 двигателя, коленчатый 20 вал 20, который выполнен с возможностью вращения вокруг оси коленчатого вала, цилиндр 30, расположенный внутри корпуса двигателя 10, и имеющий головку 35.1 поршня поршень 35, расположенный внутри цилиндра для 20 возвратно-поступательного перемещения вдоль оси возвратно-поступательного перемещения между удаленным от коленчатого вала 20 положением верхней мертвой точки (ВМТ) и приближенным к коленчатому валу 20 положением 25 нижней мертвой точки (НМТ) и функционально соединенный посредством шатуна 25 с коленчатым валом так, что совершающий возвратно-поступательное перемещение поршень 35 сообщает коленчатому валу вращательное перемещение. Камера 37 сгорания задана внутри цилиндра 30 между корпусом 30 10 двигателя и головкой 35.1 поршня напротив коленчатого вала 20. Искровая или калильная свеча 50 расположена так, что ее искровой или калильный 30 наконечник находится в камере 37 сгорания. Воздухозаборник 40 находится в соединении по текучей среде с камерой 37 сгорания при открытом впускном клапане 40.1 во время такта впуска (не показан), и отрезан от соединения по

текущей среде при закрытом впускном клапане 40.1 (то есть, по существу во время такта сжатия, такта сгорания и такта выпуска). Выпускной патрубок 45 находится в соединении по текущей среде с камерой сгорания при открытом впускном клапане 45.1 во время такта выпуска (не показан) и отрезан от соединения по текущей среде при закрытом впускном клапане 45.1 (то есть, по существу во время такта впуска, такта сжатия и такта сгорания). Водородный инжектор 60 выполнен для непосредственного впрыска водорода в камеру сгорания, а водный инжектор 70 выполнен для непосредственного впрыска (жидкой) воды в камеру сгорания.

На фиг. 1 показан двигатель в фазе распределения  $180^\circ$  до ВМТ, то есть в НМТ, в начале такта сжатия. В третьей фазе распределения от  $180^\circ$  до  $100^\circ$  до ВМТ, например в данном конкретном случае  $180^\circ$  до ВМТ, в камеру сгорания посредством водородного инжектора 60 может быть впрыснуто третье количество водорода. В четвертой фазе распределения от  $180^\circ$  до  $110^\circ$  перед ВМТ, например в данном конкретном случае  $180^\circ$  перед ВМТ, посредством водного инжектора 70 в камеру сгорания может быть впрыснуто четвертое количество воды. Хотя на фиг. 1 оба впрыска происходят одновременно на  $180^\circ$  перед ВМТ, оба впрыска могут быть разнесены по времени или могут иметь перекрытие в пределах диапазонов для третьей и четвертой фаз распределения. Третье количество водорода обычно является малым или средним, например от 5 до 50 % по массе по сравнению с общим, необходимым для эффективной работы количеством водорода, и обычно служит для улучшения диспергирования впрыскиваемого четвертого количества воды за счет весьма высокого показателя молекулярной диффузии водорода. Четвертое количество воды составляет лишь часть от общего количества впрыскиваемой за цикл воды, например от 0,5 до 5 % по массе от общего количества воды. Вода предпочтительно подлежит впрыску в виде жидкости при температурах ниже  $100^\circ\text{C}$ , обычно при температурах в диапазоне от температуры окружающей среды до  $70^\circ\text{C}$ . Впрыск воды (и водорода) на этой стадии не требует высокого давления, поскольку давление в камере сгорания примерно соответствует атмосферному (при отсутствии компрессора или турбонаддува) или немного превышает его (при наличии компрессора или турбонаддува).

На фиг. 2 показан тот же двигатель в фазе распределения от  $110^\circ$  до  $90^\circ$  перед ВМТ на ранней стадии такта сжатия. На второй фазе распределения между

110° и 90° до ВМТ в камеру сгорания посредством водного инжектора 70 может быть впрыснуто второе количество воды. В это время четвертая фаза распределения впрыска четвертого количества воды закончена, в то время как третья фаза распределения впрыска третьего количества водорода может  
5 продолжаться, если вторая фаза начинается до 100° перед ВМТ. Таким образом, хотя на фиг. 2 оба впрыска происходят одновременно примерно за 110°-100° до ВМТ, впрыск большего второго количества воды может быть единственным впрыском в это время. Опять же, третье количество водорода способствует  
10 лучшему диспергированию впрыснутого второго количества воды за счет весьма высокого показателя молекулярной диффузии водорода. Второе количество воды составляет основную долю от общего количества впрыскиваемой за цикл воды, например от 95 до 99,5 % по массе от общего количества воды. Опять же, даже в это время давление в камере сгорания все еще остается относительно низким, поэтому впрыск воды на этой стадии все еще не требует высокого давления.

15 На фиг. 3 вновь показан тот же двигатель в фазе распределения примерно за 20° до ВМТ (то есть, в конце такта сжатия). Примерно в это время, от 20° перед ВМТ во время такта сжатия до 20° после ВМТ, основное первое количество водорода может быть впрыснуто под высоким давлением в камеру сгорания для воспламенения от искровой или калильной свечи 50 в конце  
20 впрыска первого количества водорода или после его завершения, что запускает сгорание воздушно-водно-водородной смеси.

## ССЫЛОЧНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

	10	Корпус двигателя
	20	Коленчатый вал
5	25	Шатун
	30	Цилиндр (стенки)
	35	Поршень (возвратно-поступательного перемещения)
	35.1	Головка поршня
	37	Камера сгорания
10	40	Воздухозаборник
	40.1	Впускной клапан
	45	Выпускной патрубок
	45.1	Выпускной клапан
	50	Искровая или калильная свеча
15	60	Водородный инжектор
	70	Водный инжектор

## ЧЕТЫРЕХТАКТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ НА ВОДОРОДНОМ ТОПЛИВЕ

5

### Область техники

Настоящее изобретение, в целом, относится к четырехтактным двигателям внутреннего сгорания, а прежде всего к четырехтактным двигателям внутреннего сгорания на водородном топливе с повышенной эффективностью, низким уровнем загрязнения и высоким крутящим моментом, а также к способу их эксплуатации.

10

### Уровень техники

Известны четырехтактные двигатели внутреннего сгорания, которые обычно состоят из корпуса двигателя, коленчатого вала, который выполнен с возможностью вращения вокруг оси коленчатого вала, одного или нескольких цилиндров, которые расположены внутри корпуса двигателя, поршня, который расположен внутри каждого цилиндра с возможностью перемещения вдоль оси возвратно-поступательного перемещения между удаленным от коленчатого вала положением верхней мертвой точки (ВМТ), и приближенным к коленчатому валу положением нижней мертвой точки (НМТ). Совершающий возвратно-поступательное перемещение поршень функционально соединен с коленчатым валом так, что он придает коленчатому валу вращательное перемещение. Кроме того, двигатель включает в себя камеру сгорания, расположенную внутри цилиндра между корпусом двигателя и противоположной коленчатому валу головкой поршня, по меньшей мере по одному впускному клапану и по одному выпускному клапану на цилиндр, средства для подачи топлива в камеру сгорания, по меньшей мере по одной искровой свече на цилиндр, если двигатель основан на искровом зажигании топливоздушная смеси, и, как правило, блок управления двигателем для управления работой двигателя.

15

20

25

30

Функционирование четырехтактных двигателей с непосредственным впрыском топлива происходит в ходе повторяющихся циклов, каждый из которых состоит из четырех последовательных тактов, при этом такты представлены следующим образом:

Такт впуска: поршень начинает перемещение вниз от верхней мертвой точки к нижней мертвой точке, происходит открывание впускного клапана, и воздух поступает в камеру сгорания.

5 Такт сжатия: поршень перемещается из нижней мертвой точки в верхнюю мертвую точку и сжимает воздух внутри цилиндра, при этом давление и температура в камере сгорания повышаются.

10 Такт сгорания (рабочий такт): как правило, в конце такта сжатия (до того, как поршень достигнет верхней мертвой точки) или в самом начале такта сгорания топливные инжекторы начинают впрыск топлива в камеру сгорания. В определенный момент топливо либо самопроизвольно воспламеняется (воспламенение от сжатия), либо поджигается искрой от искровой свечи (искровое зажигание). Сгорание топливно-воздушной смеси создает давление на головку поршня и толкает поршень вниз, передавая тем самым энергию

15 Такт выпуска: после того как поршень достигает дна цилиндра (нижней мертвой точки), поршень начинает перемещение вверх, происходит открывание выпускного клапана, и под действием поршня выхлопные газы покидают камеру сгорания, направляясь в выпускную систему и, наконец, в атмосферу.

20 Такие двигатели в основном работают на жидком или газообразном углеводородном топливе, но в связи с ужесточением относящихся к экологии и нежелательному углеродному следу правил, водород представляется очевидным и изящным решением, позволяющим полностью избежать выбросов оксидов углерода и несгоревших углеводородов.

25 Однако замена углеводородного топлива водородом в качестве топлива не является тривиальной задачей. Водород обладает многими свойствами, которые очевидным образом отличают его от углеводородных топлив, даже по сравнению с такими, казалось бы, похожими газообразными углеводородными топливами, как метан или пропан.

30 Во-первых, водород имеет по сравнению с прочими химическими видами топлива самое высокое соотношение массы и энергии, а по соотношению массы и энергоёмкости он превосходит обычное бензиновое топливо примерно в 3 раза, спирт - в 5-6 раз, а метан и пропан - в 2,5 раза.

Во-вторых, водород имеет очень высокую скорость сгорания или скорость распространения пламени в камере сгорания двигателя, которая примерно в 6

раз выше, чем у бензина. При стехиометрическом соотношении воздуха и топлива скорость распространения пламени водорода почти на порядок выше (быстрее), чем у бензина.

5 В-третьих, водород имеет широкие пределы воспламеняемости по сравнению с другими видами топлива – от 4 до 75% по объему при 25 °С и давлении 1 бар по сравнению, например, с 1,4-2,3% по объему в воздухе в случае бензина.

10 В-четвертых, водород имеет очень низкую энергию воспламенения. Минимальная энергия воспламенения водородно-воздушной смеси составляет всего 0,017 мДж, в то время как у других горючих газов, таких как бензин, метан или пропан, она обычно составляет порядка 0,1 мДж.

15 В-пятых, водород имеет относительно высокую температуру самовоспламенения - примерно 585°С по сравнению примерно с 350°С для бензина. Несмотря на низкую энергию воспламенения, этот фактор затрудняет воспламенение водородно-воздушной смеси только за счет тепла, без дополнительного источника зажигания.

В-шестых, водород обладает очень высоким показателем молекулярной диффузии, что означает, что его способность рассеиваться в воздухе значительно выше, чем у бензина.

20 В-седьмых, водород имеет небольшую дистанцию гашения - примерно 0,6 мм по сравнению с 2,0 мм для бензина. Таким образом, расстояние от внутренней стенки цилиндра, на которой гаснет пламя сгорания, является значительно меньшим, что может оказывать негативное влияние на пленку смазки на стенках цилиндра и повышать опасность возникновения обратного удара.

25 В-восьмых, водород оказывает хорошо известное и нежелательное воздействие на механические свойства широко используемых металлов, таких как железо и сталь, обычно называемое эффектом водородного охрупчивания, что приводит к снижению пластичности и фактического напряжения при разрушении этих металлов.

30 Хотя, по меньшей мере, некоторые из этих свойств представляются на первый взгляд желательными и выгодными, они, несомненно, создают трудности при, казалось бы, тривиальной замене углеводородного топлива водородом.

Это тем более верно, что некоторые из этих свойств, а именно первые шесть, приводят к значительному повышению температуры сгорания, что, в свою очередь, увеличивает нежелательное образование в процессе сгорания оксидов азота. Кроме того, дополнительные трудности при замене  
5 углеводородного топлива водородом создают более высокие температуры сгорания в сочетании с более короткой дистанцией гашения и эффектом охрупчивания.

#### Техническая задача

Задачей настоящего изобретения является создание четырехтактного  
10 двигателя внутреннего сгорания, который, прежде всего, приспособлен к использованию водорода в качестве топлива для генерирования мощности посредством обеспечения возможности более эффективной работы без ущерба для его высокого потенциала в качестве экологически чистого решения, прежде  
15 всего в отношении выбросов оксидов азота. Другой задачей является обеспечение соответствующего способа эксплуатации такого двигателя с целью повышения как его производительности, так и улучшения его экологических преимуществ.

Документ US 2004/0003781 A1 описывает способ, в котором в камеру сгорания впрыскивается тщательно очищенная вода.

#### 20 Общее описание изобретения

Для преодоления, по меньшей мере, некоторых из вышеупомянутых проблем и достижения поставленной цели в настоящем изобретении предложен, в первом аспекте, поршневой четырехтактный двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе, включающий в себя корпус  
25 двигателя, коленчатый вал, который выполнен с возможностью вращения вокруг оси коленчатого вала, цилиндр, расположенный внутри корпуса двигателя, поршень, расположенный внутри цилиндра и совершающий возвратно-поступательное перемещение вдоль оси возвратно-поступательного перемещения между удаленным от коленчатого вала положением верхней  
30 мертвой точки (ВМТ) и приближенным к коленчатому валу положением нижней мертвой точки (НМТ) и функционально соединенный с коленчатым валом так, что поршень при возвратно-поступательном перемещении сообщает коленчатому валу вращательное перемещение, камеру сгорания, заданную внутри цилиндра между корпусом двигателя и головкой поршня напротив

коленчатого вала, впускной клапан, выпускной клапан, водородный инжектор, выполненный для непосредственного впрыска водорода в камеру сгорания, водный инжектор, выполненный для непосредственного впрыска воды в камеру сгорания, искровую или калильную свечу, а также блок управления двигателем, выполненный для управления фазами распределения и количеством впрыска водорода и впрыска воды, причем блок управления двигателем выполнен для впрыска в камеру сгорания третьего количества водорода на третьей фазе распределения от  $180^\circ$  до  $100^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия, впрыска в камеру сгорания первого количества водорода на первой фазе распределения от  $20^\circ$  до ВМТ во время такта сжатия до  $20^\circ$  после ВМТ и для впрыска второго количества (жидкой или газообразной) воды в камеру сгорания на второй фазе распределения от  $110^\circ$  до  $90^\circ$ , предпочтительно от менее чем  $110^\circ$  до более чем  $90^\circ$ , например от  $107,5^\circ$  до  $92,5^\circ$  или даже от  $105^\circ$  до  $95^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия.

Следует предварительно отметить, что в настоящем контексте порядковые номера «первый», «второй», «третий» и «четвертый» использованы исключительно для обозначения терминов «объем» и «фаза распределения» и для однозначной связи соответствующего «количества» впрыскиваемого материала, то есть водорода или воды, с «фазой распределения» его впрыска. Таким образом, «первое количество» подлежит впрыску на «первой фазе распределения», «второе количество» подлежит впрыску на «второй фазе распределения» и так далее. Таким образом, порядковые числительные не подразумевают каких-либо других взаимных отношений по характеру, величине, важности, хронологическому порядку и тому подобному. Таким образом, общее количество водорода за цикл равно сумме впрыснутых на первой и третьей фазах распределения первого количества водорода и третьего количества водорода, тогда как общее количество впрыснутой за цикл воды равно впрыснутому на второй фазе распределения второму количеству воды, или, в описанных ниже более подробно некоторых предпочтительных вариантах осуществления, сумме впрыснутых на протяжении второй и четвертой фаз распределения второго количества воды и четвертого количества воды.

Изобретатели обнаружили, что впрыск жидкой воды во время такта сжатия на фазе распределения примерно от  $110^\circ$  до  $90^\circ$  перед ВМТ позволяет преодолевать некоторые возникающие при использовании водорода проблемы и

5 влияние его упомянутых выше особых свойств. В самом деле, введение  
некоторого количества воды в камеру сгорания обеспечивает возможность не  
только снижения температуры в камере сгорания во время сжатия, но также и  
снижения температуры во время сгорания, тем самым позволяя уменьшать  
10 образование нежелательных оксидов азота. Фактически было обнаружено, что  
впрыск воды, даже задолго до инициирования сгорания посредством искровой  
или калильной свечи, и также задолго до впрыска первого количества водорода,  
позволяет, по меньшей мере, в некоторой степени контролировать последствия  
высокого отношения массы к энергии и весьма высокой скорости сгорания  
15 водорода. Такой относительно ранний впрыск воды в камеру сгорания, однако,  
не только является выгодным с точки зрения, по меньшей мере, частичного  
замедления горения водорода, но и может быть осуществлен энергетически  
выгодным образом. В самом деле, на фазе распределения примерно от  $110^\circ$  до  
 $90^\circ$  до ВМТ давление (и температура) внутри цилиндра является еще  
20 относительно низкой, что означает, что для впрыска воды на этой стадии не  
требуются ни форсунки высокого давления, ни дорогостоящие и  
энергозатратные насосы высокого давления. Таким образом, вода обычно может  
быть впрыснута в жидком виде при температуре значительно ниже  $150^\circ\text{C}$ ,  
предпочтительно ниже примерно  $100^\circ\text{C}$ , например ниже  $70^\circ\text{C}$ , ниже  $50^\circ\text{C}$  или  
25 даже при температуре окружающей среды.

В общем случае, при впрыске воды в камеру сгорания двигателя  
внутреннего сгорания существует опасность недостаточно быстрого испарения  
воды и ее оседания на стенках цилиндра, что может привести к нарушению  
целостности смазочной пленки на стенках цилиндра и к разжижению смазки, что  
25 является особо вредным для работающего на водороде двигателя вследствие  
упомянутых выше эффекта водородного охрупчивания и небольшой дистанции  
гашения. Изобретатели обнаружили, что путем впрыска относительно  
небольшого (третьего) количества водорода на фазе распределения до впрыска  
(второго количества) жидкой воды этот негативный эффект осаждения воды  
30 может быть в значительной степени взят под контроль или даже предотвращен.  
Предполагается, что этот благоприятный эффект обусловлен упомянутым выше  
весьма высоким показателем молекулярной диффузии водорода, что  
способствует диспергированию воды и тем самым улучшает ее испарение, что, в  
свою очередь, снижает опасность вредного осаждения на стенках цилиндра. Для

достижения указанного эффекта (третье количество) водорода может быть впрыснут на (третьей) фазе распределения от  $180^\circ$  до  $100^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия, наиболее предпочтительно, не позднее, чем перед началом впрыска второго количества воды.

5 Также было обнаружено, что выгодное диспергирующее действие водорода на впрыск воды может быть достигнуто при использовании лишь относительно небольшого количества водорода в качестве третьего количества. В самом деле, предпочтительным является, когда блок управления двигателем выполнен для управления третьим количеством водорода так, что он составляет 5-50 % по  
10 массе, предпочтительно 10-45 % по массе, и прежде всего 15-40 % по массе, от общего количества водорода, причем общее количество водорода (за цикл) представляет собой сумму третьего количества и первого количества водорода.

Хотя ранний впрыск эффективного количества воды, скорее всего, может привести к разрушению смазочной пленки или разбавлению смазки, поскольку  
15 температура внутри цилиндра в это время является слишком низкой для обеспечения испарения воды, изобретатели неожиданным образом обнаружили, что это вовсе не исключает впрыск воды в эти ранние моменты времени при работе в соответствии с настоящим изобретением. В самом деле, благодаря раннему впрыску третьего количества водорода и обусловленному его весьма  
20 высоким показателем молекулярной диффузии диспергирующему действию впрыск относительно небольшого количества воды может быть осуществлен также и очень рано во время такта сжатия, что обеспечивает возможность введения дополнительное количество воды в камеру сгорания без опасности возникновения проблем со смазыванием. Таким образом, в предпочтительных  
25 вариантах осуществления блок управления двигателем выполнен для последующего впрыска в камеру сгорания четвертого количества воды на четвертой фазе распределения от  $180^\circ$  до  $110^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия. Впрыск третьего количества водорода может быть начат до, одновременно или после впрыска четвертого количества воды, то есть может происходить  
30 перекрытие по времени впрыска четвертого количества воды с впрыском третьего количества водорода. Предпочтительно, впрыск четвертого количества воды происходит на четвертой фазе распределения, что в самом раннем случае совпадает по времени с впрыском третьего количества водорода.

Предпочтительно, блок управления двигателем выполнен для управления четвертым количеством воды, который составляет 0,5-5,0 % по массе, предпочтительно 0,75-4,0 % по массе, прежде всего 0,85-3,0 % по массе, от общего количества воды, причем общее количество воды за цикл представляет собой сумму второго количества воды и четвертого количества воды.

Помимо уже упомянутых выше предпочтительных признаков и эффектов настоящего изобретения, еще одним его главным преимуществом является тот факт, что присутствие добавленной воды уменьшает детонацию, что, в свою очередь, позволяет эксплуатировать двигатель внутреннего сгорания при значениях лямбды (то есть, коэффициента эквивалентности воздуха к топливу), которые значительно ниже тех, которые обычно могут быть использованы для работающих на водороде двигателей внутреннего сгорания. В самом деле, ввиду, прежде всего, высокого отношения массы к энергии и очень высокой скорости сгорания водорода, работающие на водородном топливе двигатели обычно должны работать в условиях крайне обедненной смеси, как для обеспечения контроля над температурой двигателя, так и для снижения образования оксидов азота. Как следствие, обычные, работающие на водородном топливе двигатели не могут работать с высоким термическим коэффициентом полезного действия, например столь же высоким, как у дизельных двигателей.

Эффективный впрыск воды согласно настоящему изобретению, будь то впрыск только второго количества воды на второй фазе распределения или дополнительный ранний впрыск четвертого количества воды на четвертой фазе распределения, позволяет работать при значениях лямбда, которые являются значительно меньшими, чем значения лямбда в обычных двигателях внутреннего сгорания на водородном топливе, тем самым обеспечивая возможность работы с более высоким коэффициентом полезного действия. Как следствие, блок управления двигателем обычно выполнен для управления общим количеством водорода за цикл и общим количеством жидкой воды за цикл (последний представляет собой либо только второе количество воды, если нет впрыска четвертого количества воды, либо сумму второго и четвертого количества воды) для получения значения лямбды между 1,5 и 2,5, предпочтительно между 1,6 и 2,4, более предпочтительно между 1,7 и 2,3.

Таким образом, эффективный впрыск воды согласно настоящему изобретению также устраняет или, по меньшей мере, уменьшает необходимость

в дополнительном дорогостоящем и сложном оборудовании, таком как клапаны рециркуляции отработавших газов (РОГ) или усовершенствованные турбокомпрессоры.

Кроме того, было обнаружено, что массовое соотношение воды и водорода, как ни странно, в значительной степени не зависит от частоты вращения двигателя, и что преимущества изобретения, такие как более эффективная работа, меньшее образование оксидов азота, меньшая нагрузка на двигатель и так далее, могут быть получены не только для стационарных двигателей, работающих только при определенных значениях числа оборотов в минуту, например в электрогенераторах, но также присутствуют при любом другом типе применения, например, прежде всего, для автомобильных двигателей. Предпочтительно, блок управления двигателем выполнен для управления общим количеством водорода и общим количеством воды для получения массового отношения воды к водороду в диапазоне 1,0-2,0, предпочтительно 1,3-1,9, более предпочтительно 1,5-1,7, например примерно 1,6.

В особо предпочтительных вариантах осуществления поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе согласно настоящему изобретению первая фаза распределения находится от  $15^\circ$  до ВМТ во время такта сжатия до  $15^\circ$  после ВМТ и/или вторая фаза распределения находится от  $105^\circ$  до  $95^\circ$ , предпочтительно приблизительно  $100^\circ$ , перед верхней мертвой точкой (ВМТ) во время такта сжатия и/или третья фаза распределения впрыска водорода простирается от  $175^\circ$  до  $120^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия и/или, если применимо, четвертая фаза распределения находится от  $175^\circ$  до  $120^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия.

Добавление превращающейся в газ жидкой воды позволяет снизить температуру, что, в свою очередь, позволяет увеличить фактическую степень сжатия, то есть соотношение между количеством цилиндра и камеры сгорания в двигателе внутреннего сгорания при ее максимальном и минимальном значениях. В предпочтительных поршневых четырехтактных двигателях внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе фактическая степень сжатия двигателя составляет от 12,9:1 до 17:1, предпочтительно от 13,4:1 до 16,5:1, более предпочтительно от 13,9:1 до 16:1.

Во втором своем аспекте изобретение аналогичным образом предлагает способ эксплуатации поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе, предпочтительно двигателя согласно первому аспекту, включающего в себя корпус двигателя, 5 коленчатый вал, который выполнен с возможностью вращения вокруг оси коленчатого вала, цилиндр, расположенный внутри корпуса двигателя, поршень, расположенный внутри цилиндра и совершающий возвратно-поступательное перемещение вдоль оси возвратно-поступательного перемещения между удаленным от коленчатого вала положением верхней мертвой точки (ВМТ) и 10 приближенным к коленчатому валу положением нижней мертвой точки (НМТ) и функционально соединенный с коленчатым валом так, что поршень при возвратно-поступательном перемещении сообщает коленчатому валу вращательное перемещение, камеру сгорания, заданную внутри цилиндра между корпусом двигателя и головкой поршня напротив коленчатого вала, впускной 15 клапан, выпускной клапан, водородный инжектор, выполненный для непосредственного впрыска водорода в камеру сгорания, водный инжектор, выполненный для непосредственного впрыска воды в камеру сгорания, искровую или калильную свечу, а также блок управления двигателем, выполненный для осуществления шагов способа, причем способ включает в себя 20 на каждом четырехтактном цикле шаги:

А) впрыска в камеру сгорания посредством водородного инжектора третьего количества водорода на третьей фазе распределения от  $180^\circ$  до  $100^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия,

Б) впрыска в камеру сгорания посредством водородного инжектора 25 первого количества водорода на первой фазе распределения от  $20^\circ$  до ВМТ во время такта сжатия до  $20^\circ$  после ВМТ, и

В) впрыска в камеру сгорания посредством водного инжектора второго количества воды на второй фазе распределения от  $110^\circ$  до  $90^\circ$ , предпочтительно от менее  $110^\circ$  до более  $90^\circ$ , например от  $107,5^\circ$  до  $92,5^\circ$  или даже от  $105^\circ$  до  $95^\circ$ , 30 перед ВМТ во время такта сжатия.

В настоящем способе эксплуатации поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе третьим количеством водорода на шаге А), предпочтительно, управляют так, что он составляет от 5 до 50 % по массе от общего количества водорода, причем общее

количество водорода представляет собой сумму третьего количества и первого количества водорода.

Предпочтительно, способ дополнительно включает в себя шаг:

5 Г) впрыска в камеру сгорания посредством водного инжектора четвертого количества воды на фазе распределения от  $180^\circ$  до  $110^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия.

10 Четвертым количеством воды, предпочтительно, управляют так, что он составляет от 0,5 до 5 % по массе от общего количества воды, причем общее количество воды представляет собой сумму второго количества воды и четвертого количества воды.

В особо предпочтительных вариантах осуществления общим количеством водорода и вторым или общим количеством воды управляют для получения значения лямбда в диапазоне 1,5-2,5, предпочтительно 1,6-2,4, более предпочтительно 1,7-2,3, причем значение лямбда представляет собой коэффициент эквивалентности воздуха к топливу.

20 В способе эксплуатации поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе общим количеством водорода и общим количеством воды, предпочтительно, управляют для получения массового отношения воды к водороду, составляющего 1,0-2,0, более предпочтительно 1,3-1,9, наиболее предпочтительно 1,5-1,7, прежде всего примерно 1,6.

25 В рамках способа эксплуатации поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе могут быть предусмотрены такие регулировки, что на шаге А) третью фазу распределения впрыска водорода задают от  $180^\circ$  до  $100^\circ$ , предпочтительно от  $175^\circ$  до  $120^\circ$ , до ВМТ во время такта сжатия и/или, что на шаге В) первую фазу распределения задают от  $15^\circ$  до ВМТ во время такта сжатия до  $15^\circ$  после ВМТ и/или, что на шаге Б) вторую фазу распределения задают от  $105^\circ$  до  $95^\circ$ , предпочтительно приблизительно  $100^\circ$ , до верхней мертвой точки (ВМТ) во время такта сжатия и/или, что четвертую фазу распределения, если применимо, 30 задают от  $180^\circ$  до  $110^\circ$ , предпочтительно от  $175^\circ$  до  $120^\circ$  до ВМТ, во время такта сжатия.

Фазы распределения двигателя внутреннего сгорания в целом, а прежде всего фазы распределения впрыска, как указано в настоящем документе,

обозначены углом поворота коленчатого вала, выраженным относительно положения совершающего возвратно-поступательное перемещение в цилиндре двигателя поршня, при необходимости, относительно соответствующего такта рабочего цикла. Выражения «верхняя мертвая точка» или «ВМТ» и «нижняя мертвая точка» или «НМТ» являются общеизвестными выражениями в области двигателей внутреннего сгорания и относятся к обоим конечным положениям совершающего вдоль оси возвратно-поступательного перемещения возвратно-поступательное перемещение поршня или, прежде всего, верхней части поршня в цилиндре. Верхняя мертвая точка является наиболее удаленным от коленчатого вала положением поршня, в то время как нижняя мертвая точка является наиболее приближенным к коленчатому валу его положением. Таким образом, положения вдоль оси возвратно-поступательного перемещения обычно указывают в градусах ( $^{\circ}$ ) от любой мертвой точки относительно коленчатого вала и в направлении его вращения. Зачастую перед вышеприведенными выражениями стоит предлог «после» или «до». Например: « $110^{\circ}$  до верхней мертвой точки» (сокращенно  $110^{\circ}$  до ВМТ или  $110^{\circ}$  ДВМТ) означает, что верхняя часть поршня находится в положении вдоль оси возвратно-поступательного перемещения, которое соответствует углу поворота коленчатого вала на  $-110^{\circ}$  относительно верхней мертвой точки. Обозначение «диапазон от  $20^{\circ}$  до  $+20^{\circ}$  от верхней мертвой точки» эквивалентно «от  $20^{\circ}$  до верхней мертвой точки до  $20^{\circ}$  после верхней мертвой точки» или «от  $20^{\circ}$  до ВМТ до  $20^{\circ}$  после ВМТ».

Кроме того, указания на фазы распределения впрыска в данном контексте означают начало соответствующего впрыска (впрысков). В самом деле, хотя продолжительности впрысков по необходимости являются скоротечными, они неизбежно требуют некоторого времени, в течение которого поршень продолжает свое перемещение в цилиндре.

Впускной клапан(ы) и выпускной клапан(ы) могут быть представлены любым подходящим типом клапана, предпочтительно они независимо друг от друга могут быть представлены тарельчатыми клапанами, используемыми почти во всех четырехтактных двигателях, золотниками или дисковыми поворотными клапанами, которые могут быть приведены в действие либо посредством двигателя как такового (двигатель, таким образом, является приводом), например посредством распределительных валов, либо посредством отдельных

приводов, например пневматических, гидравлических или электрических приводов. Например, выполненная в виде золотника или поворотного диска клапанная система может выгодно отличаться тем, что позволяет задавать время открытия и закрытия выпускного клапана в нижней мертвой точке и открывать выпускной клапан перед закрытием выпускного клапана.

Двигатель внутреннего сгорания согласно изобретению может дополнительно включать в себя водный бак в качестве источника воды для питания водного инжектора или инжекторов, а также конденсатный узел, расположенный ниже по потоку от выпускного клапана (клапанов). Этот конденсатный узел, например теплообменник, может быть предусмотрен для конденсации пара из выхлопных газов в воду, которая затем может быть подана по трубопроводам в водный бак. Такая рециркуляция используемой для производства пара воды представляет особый интерес для мобильных применений, где количество перевозимой воды обычно является ограниченным. Кроме того, повторное использование воды также сокращает число ее дозаправок. Также могут быть предусмотрены фильтрующие средства для фильтрации отработанного пара. Водный бак предпочтительно предназначен как для заполнения водой с помощью обычной заливной горловины, так и для заполнения отработанным конденсатом.

Очевидно, двигатель внутреннего сгорания согласно изобретению может состоять из нескольких цилиндров. Кроме того, каждый из этих цилиндров может включать в себя несколько водных инжекторов, которые предпочтительно распределены по периметру камеры сгорания. Водные инжекторы могут быть размещены в любом подходящем, расположенном внутри камеры сгорания месте цилиндра.

Все приведенные в настоящем документе явные значения следует понимать как примерные значения, если явно не указано иное. Таким образом, каждое из указанных явных значений следует понимать как охватывающее собой диапазон значений от 10% ниже до 10% выше указанного значения. Явные значения, которым предшествует термин «примерно», «приблизительно» или тому подобное, следует понимать как охватывающие собой диапазон значений от 20 % ниже до 20 % выше указанных значений.

### Краткое описание чертежей

Предпочтительные варианты осуществления изобретения далее описаны, в качестве примера, с отсылками на сопроводительные чертежи, на которых:

Фиг. 1-3 представляют собой схематические виды в частичном поперечном сечении одного из вариантов осуществления поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе в различных фазах распределения во время такта сжатия, причем на фиг. 1 показан двигатель в фазе распределения  $180^\circ$  перед ВМТ (то есть, в момент НМТ), на фиг. 2 показан двигатель в фазе распределения от  $110^\circ$  до  $90^\circ$  перед ВМТ и на фиг. 3 показан двигатель в фазе распределения приблизительно  $20^\circ$  перед ВМТ.

Другие подробности и преимущества настоящего изобретения станут очевидны из последующего подробного описания нескольких неограничивающих вариантов осуществления с отсылкой на прилагаемые чертежи.

### Описание предпочтительных вариантов осуществления

Фиг. 1-3 представляют собой схематические изображения одного из вариантов осуществления поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе согласно изобретению. Одинаковые ссылочные обозначения на этих чертежах обозначают идентичные признаки.

Двигатель внутреннего сгорания имеет корпус 10 двигателя, коленчатый вал 20, который выполнен с возможностью вращения вокруг оси коленчатого вала, цилиндр 30, расположенный внутри корпуса двигателя 10, и имеющий головку 35.1 поршня поршень 35, расположенный внутри цилиндра для возвратно-поступательного перемещения вдоль оси возвратно-поступательного перемещения между удаленным от коленчатого вала 20 положением верхней мертвой точки (ВМТ) и приближенным к коленчатому валу 20 положением нижней мертвой точки (НМТ) и функционально соединенный посредством шатуна 25 с коленчатым валом так, что совершающий возвратно-поступательное перемещение поршень 35 сообщает коленчатому валу вращательное перемещение. Камера 37 сгорания задана внутри цилиндра 30 между корпусом 10 двигателя и головкой 35.1 поршня напротив коленчатого вала 20. Искровая или калильная свеча 50 расположена так, что ее искровой или калильный

наконечник находится в камере 37 сгорания. Воздухозаборник 40 находится в соединении по текучей среде с камерой 37 сгорания при открытом впускном клапане 40.1 во время такта впуска (не показан), и отрезан от соединения по текучей среде при закрытом впускном клапане 40.1 (то есть, по существу во время такта сжатия, такта сгорания и такта выпуска). Выпускной патрубок 45 находится в соединении по текучей среде с камерой сгорания при открытом выпускном клапане 45.1 во время такта выпуска (не показан) и отрезан от соединения по текучей среде при закрытом выпускном клапане 45.1 (то есть, по существу во время такта впуска, такта сжатия и такта сгорания). Водородный инжектор 60 выполнен для непосредственного впрыска водорода в камеру 37 сгорания, а водный инжектор 70 выполнен для непосредственного впрыска (жидкой) воды в камеру 37 сгорания.

На фиг. 1 показан двигатель в фазе распределения  $180^\circ$  до ВМТ, то есть в НМТ, в начале такта сжатия. В третьей фазе распределения от  $180^\circ$  до  $100^\circ$  до ВМТ, например в данном конкретном случае  $180^\circ$  до ВМТ, в камеру 37 сгорания посредством водородного инжектора 60 может быть впрыснуто третье количество водорода. В четвертой фазе распределения от  $180^\circ$  до  $110^\circ$  перед ВМТ, например в данном конкретном случае  $180^\circ$  перед ВМТ, посредством водного инжектора 70 в камеру 37 сгорания может быть впрыснуто четвертое количество воды. Хотя на фиг. 1 оба впрыска происходят одновременно на  $180^\circ$  перед ВМТ, оба впрыска могут быть разнесены по времени или могут иметь перекрытие в пределах диапазонов для третьей и четвертой фаз распределения. Третье количество водорода обычно является малым или средним, например от 5 до 50 % по массе по сравнению с общим, необходимым для эффективной работы количеством водорода, и обычно служит для улучшения диспергирования впрыскиваемого четвертого количества воды за счет весьма высокого показателя молекулярной диффузии водорода. Четвертое количество воды составляет лишь часть от общего количества впрыскиваемой за цикл воды, например от 0,5 до 5 % по массе от общего количества воды. Вода предпочтительно подлежит впрыску в виде жидкости при температурах ниже  $100^\circ\text{C}$ , обычно при температурах в диапазоне от температуры окружающей среды до  $70^\circ\text{C}$ . Впрыск воды (и водорода) на этой стадии не требует высокого давления, поскольку давление в камере сгорания примерно соответствует атмосферному (при

отсутствии компрессора или турбонаддува) или немного превышает его (при наличии компрессора или турбонаддува).

На фиг. 2 показан тот же двигатель в фазе распределения от  $110^\circ$  до  $90^\circ$  перед ВМТ на ранней стадии такта сжатия. На второй фазе распределения между  $110^\circ$  и  $90^\circ$  до ВМТ в камеру сгорания посредством водного инжектора 70 может быть впрыснуто второе количество воды. В это время четвертая фаза распределения впрыска четвертого количества воды закончена, в то время как третья фаза распределения впрыска третьего количества водорода может продолжаться, если вторая фаза начинается до  $100^\circ$  перед ВМТ. Таким образом, хотя на фиг. 2 оба впрыска происходят одновременно примерно за  $110^\circ$ - $100^\circ$  до ВМТ, впрыск большего второго количества воды может быть единственным впрыском в это время. Опять же, третье количество водорода способствует лучшему диспергированию впрыснутого второго количества воды за счет весьма высокого показателя молекулярной диффузии водорода. Второе количество воды составляет основную долю от общего количества впрыскиваемой за цикл воды, например от 95 до 99,5 % по массе от общего количества воды. Опять же, даже в это время давление в камере сгорания все еще остается относительно низким, поэтому впрыск воды на этой стадии все еще не требует высокого давления.

На фиг. 3 вновь показан тот же двигатель в фазе распределения примерно за  $20^\circ$  до ВМТ (то есть, в конце такта сжатия). Примерно в это время, от  $20^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия до  $20^\circ$  после ВМТ, основное первое количество водорода может быть впрыснуто под высоким давлением в камеру сгорания для воспламенения от искровой или калильной свечи 50 в конце впрыска первого количества водорода или после его завершения, что запускает сгорание воздушно-водно-водородной смеси.

## ССЫЛОЧНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

	10	Корпус двигателя
	20	Коленчатый вал
5	25	Шатун
	30	Цилиндр (стенки)
	35	Поршень (возвратно-поступательного перемещения)
	35.1	Головка поршня
	37	Камера сгорания
10	40	Воздухозаборник
	40.1	Впускной клапан
	45	Выпускной патрубок
	45.1	Выпускной клапан
	50	Искровая или калильная свеча
15	60	Водородный инжектор
	70	Водный инжектор

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Поршневой четырехтактный двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе, включающий в себя корпус (10) двигателя, коленчатый вал (20), который выполнен с возможностью вращения вокруг оси коленчатого вала, цилиндр (30), расположенный внутри корпуса (10) двигателя, поршень (35), расположенный внутри цилиндра и совершающий возвратно-поступательное перемещение вдоль оси возвратно-поступательного перемещения между удаленным от коленчатого вала (20) положением верхней мертвой точки (ВМТ) и приближенным к коленчатому валу (20) положением нижней мертвой точки (НМТ) и функционально соединенный с коленчатым валом так, что поршень (35) при возвратно-поступательном перемещении сообщает коленчатому валу вращательное перемещение, камеру (37) сгорания, заданную внутри цилиндра (30) между корпусом (10) двигателя и головкой (35) поршня напротив коленчатого вала (20), впускной клапан (40.1), выпускной клапан (45.1), водородный инжектор (60), выполненный для непосредственного впрыска водорода в камеру (37) сгорания, водный инжектор (70), выполненный для непосредственного впрыска воды в камеру (37) сгорания, искровую или калильную свечу (50), а также блок управления двигателем, выполненный для управления фазами распределения и количеством впрыска водорода и впрыска воды, причем блок управления двигателем выполнен для впрыска в камеру сгорания первого количества водорода на первой фазе распределения от  $20^\circ$  до ВМТ во время такта сжатия до  $20^\circ$  после ВМТ, для впрыска в камеру сгорания второго количества воды на второй фазе распределения от  $110^\circ$  до  $90^\circ$  до ВМТ во время такта сжатия, и для впрыска в камеру сгорания третьего количества водорода на третьей фазе распределения от  $180^\circ$  до  $100^\circ$  до ВМТ во время такта сжатия.

2. Поршневой четырехтактный двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по п. 1, причем блок управления двигателем выполнен для управления третьим количеством водорода, составляющим от 5 до 50 % по массе от общего количества водорода, и причем общее количество водорода представляет собой сумму третьего количества и первого количества водорода.

3. Поршневой четырехтактный двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по п. 1 или п. 2, причем блок управления двигателем выполнен для дополнительного впрыска в камеру сгорания четвертого количества воды на четвертой фазе распределения от  $180^\circ$  до  $110^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия.

4. Поршневой четырехтактный двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по п. 3, причем блок управления двигателем выполнен для управления четвертым количеством воды, составляющим от 0,5 до 5 % по массе от общего количества воды, и причем общее количество воды представляет собой сумму второго количества воды и четвертого количества воды.

5. Поршневой четырехтактный двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по одному из п.п. 1-4, причем блок управления двигателем выполнен для управления общим количеством водорода и вторым или общим количеством воды для получения значения лямбда между 1,5 и 2,5, предпочтительно между 1,6 и 2,4, более предпочтительно между 1,7 и 2,3, и причем значение лямбда представляет собой коэффициент эквивалентности воздуха к топливу.

6. Поршневой четырехтактный двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по одному из п.п. 1-5, причем блок управления двигателем выполнен для управления общим количеством водорода и общим количеством воды для получения массового отношения воды к водороду в диапазоне 1,0-2,0, предпочтительно 1,3-1,9, более предпочтительно 1,5-1,7.

7. Поршневой четырехтактный двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по одному из п.п. 1-6, причем первая фаза распределения находится от  $15^\circ$  до ВМТ во время такта сжатия до  $15^\circ$  после ВМТ и/или вторая фаза распределения находится от  $105^\circ$  до  $95^\circ$ , предпочтительно приблизительно  $100^\circ$ , перед верхней мертвой точкой (ВМТ) во

время такта сжатия и/или третья фаза распределения впрыска водорода простирается от  $175^\circ$  до  $120^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия и/или, если применимо, четвертая фаза распределения находится от  $175^\circ$  до  $120^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия.

5

8. Поршневой четырехтактный двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по одному из п.п. 1-7, причем степень сжатия двигателя составляет от 12,9:1 до 17:1, предпочтительно от 13,4:1 до 16,5:1, более предпочтительно от 13,9:1 до 16:1.

10

9. Способ эксплуатации поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе, включающего в себя корпус (10) двигателя, коленчатый вал (20), который выполнен с возможностью вращения вокруг оси коленчатого вала, цилиндр (30), расположенный внутри корпуса (10) двигателя, поршень (35), расположенный внутри цилиндра (30) и совершающий возвратно-поступательное перемещение вдоль оси возвратно-поступательного перемещения между удаленным от коленчатого вала (20) положением верхней мертвой точки (ВМТ) и приближенным к коленчатому валу (20) положением нижней мертвой точки (НМТ) и функционально соединенный с коленчатым валом так, что поршень (35) при возвратно-поступательном перемещении сообщает коленчатому валу (20) вращательное перемещение, камеру (37) сгорания, заданную внутри цилиндра (30) между корпусом (10) двигателя и головкой (35) поршня напротив коленчатого вала (20), впускной клапан (40.1), выпускной клапан (45.1), водородный инжектор (60), выполненный для непосредственного впрыска водорода в камеру (37) сгорания, водный инжектор (70), выполненный для непосредственного впрыска воды в камеру (37) сгорания, искровую или калильную свечу (50), а также блок управления двигателем, выполненный для осуществления шагов способа, причем способ включает в себя на каждом четырехтактном цикле шаги:

30

А) впрыска в камеру (37) сгорания посредством водородного инжектора (60) третьего количества водорода на третьей фазе распределения от  $180^\circ$  до  $100^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия,

Б) впрыска в камеру (37) сгорания посредством водного инжектора (70) второго количества воды на второй фазе распределения от  $110^\circ$  до  $90^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия, и

В) впрыска в камеру (37) сгорания посредством водородного инжектора (60) первого количества водорода на первой фазе распределения от  $20^\circ$  до ВМТ во время такта сжатия до  $20^\circ$  после ВМТ.

10. Способ эксплуатации поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по п. 9, причем третьим количеством водорода на шаге А) управляют так, что он составляет от 5 до 50 % по массе от общего количества водорода, причем общее количество водорода представляет собой сумму третьего количества и первого количества водорода.

15 11. Способ эксплуатации поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по п. 9 или п. 10, также включающий в себя шаг:

Г) впрыска в камеру (37) сгорания посредством водного инжектора (70) четвертого количества воды на фазе распределения от  $180^\circ$  до  $110^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия.

20 12. Способ эксплуатации поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по одному из п.п. 9-11, причем четвертым количеством воды управляют так, что он составляет от 0,5 до 5 % по массе от общего количества воды, и причем общее количество воды представляет собой сумму второго количества воды и четвертого количества воды.

30 13. Способ эксплуатации поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по одному из п.п. 9-12, причем общим количеством водорода и вторым или общим количеством воды управляют для получения значения лямбда в диапазоне 1,5-2,5, предпочтительно 1,6-2,4, более предпочтительно 1,7-2,3, и причем значение лямбда представляет собой коэффициент эквивалентности воздуха к топливу.

14. Способ эксплуатации поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по одному из п.п. 9-13, причем общим количеством водорода и общим количеством воды управляют для получения массового отношения воды к водороду, составляющего 1,0-2,0, предпочтительно 1,3-1,9, более предпочтительно 1,5-1,7.

15. Способ эксплуатации поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по одному из п.п. 9-14, причем на шаге А) третью фазу распределения впрыска водорода задают от  $175^\circ$  до  $120^\circ$  до ВМТ во время такта сжатия и/или на шаге В) первую фазу распределения задают от  $15^\circ$  до ВМТ во время такта сжатия до  $15^\circ$  после ВМТ и/или на шаге Б) вторую фазу распределения задают от  $105^\circ$  до  $95^\circ$ , предпочтительно приблизительно  $100^\circ$ , до верхней мертвой точки (ВМТ) во время такта сжатия и/или четвертую фазу распределения, если применимо, задают от  $175^\circ$  до  $120^\circ$  до ВМТ во время такта сжатия.

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Поршневой четырехтактный двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе, включающий в себя корпус (10) двигателя, коленчатый вал (20), который выполнен с возможностью вращения вокруг оси коленчатого вала, цилиндр (30), расположенный внутри корпуса (10) двигателя, поршень (35), расположенный внутри цилиндра и совершающий возвратно-поступательное перемещение вдоль оси возвратно-поступательного перемещения между удаленным от коленчатого вала (20) положением верхней мертвой точки (ВМТ) и приближенным к коленчатому валу (20) положением нижней мертвой точки (НМТ) и функционально соединенный с коленчатым валом так, что поршень (35) при возвратно-поступательном перемещении сообщает коленчатому валу вращательное перемещение, камеру (37) сгорания, заданную внутри цилиндра (30) между корпусом (10) двигателя и головкой (35) поршня напротив коленчатого вала (20), впускной клапан (40.1), выпускной клапан (45.1), водородный инжектор (60), выполненный для непосредственного впрыска водорода в камеру (37) сгорания, водный инжектор (70), выполненный для непосредственного впрыска воды в камеру (37) сгорания, искровую или калильную свечу (50), а также блок управления двигателем, выполненный для управления фазами распределения и количеством впрыска водорода и впрыска воды, причем блок управления двигателем выполнен для впрыска водорода в камеру сгорания на первой фазе распределения от  $20^\circ$  до ВМТ во время такта сжатия до  $20^\circ$  после ВМТ, для впрыска воды в камеру сгорания на второй фазе распределения от  $110^\circ$  до  $90^\circ$  до ВМТ во время такта сжатия, и для впрыска водорода в камеру сгорания на третьей фазе распределения от  $180^\circ$  до  $100^\circ$  до ВМТ во время такта сжатия.

2. Поршневой четырехтактный двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по п. 1, причем блок управления двигателем выполнен для управления количеством водорода, впрыскиваемым на третьей фазе распределения, так, что он составляет от 5 до 50 % по массе от общего количества водорода, и причем общее количество водорода представляет собой сумму количеств водорода, впрыскиваемых на первой и третьей фазах распределения.

3. Поршневой четырехтактный двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по п. 1 или п. 2, причем блок управления двигателем выполнен для дополнительного впрыска воды в камеру сгорания на четвертой фазе распределения от  $180^\circ$  до  $110^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия.

4. Поршневой четырехтактный двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по п. 3, причем блок управления двигателем выполнен для управления количеством воды, впрыскиваемым на четвертой фазе распределения, так, что он составляет от 0,5 до 5 % по массе от общего количества воды, и причем общее количество воды представляет собой сумму количеств воды, впрыскиваемых на второй и четвертой фазах распределения.

5. Поршневой четырехтактный двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по одному из п.п. 1-4, причем блок управления двигателем выполнен для управления общим количеством водорода и количеством воды, впрыскиваемым на второй фазе распределения, или общим количеством воды для получения значения лямбда между 1,5 и 2,5, предпочтительно между 1,6 и 2,4, более предпочтительно между 1,7 и 2,3, и причем значение лямбда представляет собой коэффициент эквивалентности воздуха к топливу.

6. Поршневой четырехтактный двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по одному из п.п. 1-5, причем блок управления двигателем выполнен для управления общим количеством водорода и общим количеством воды для получения массового отношения воды к водороду в диапазоне 1,0-2,0, предпочтительно 1,3-1,9, более предпочтительно 1,5-1,7.

7. Поршневой четырехтактный двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по одному из п.п. 1-6, причем первая фаза распределения находится от  $15^\circ$  до ВМТ во время такта сжатия до

15° после ВМТ и/или вторая фаза распределения находится от 105° до 95°, предпочтительно приблизительно 100°, перед верхней мертвой точкой (ВМТ) во время такта сжатия и/или третья фаза распределения впрыска водорода простирается от 175° до 120° перед ВМТ во время такта сжатия и/или, если применимо, четвертая фаза распределения находится от 175° до 120° перед ВМТ во время такта сжатия.

8. Поршневой четырехтактный двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по одному из п.п. 1-7, причем степень сжатия двигателя составляет от 12,9:1 до 17:1, предпочтительно от 13,4:1 до 16,5:1, более предпочтительно от 13,9:1 до 16:1.

9. Способ эксплуатации поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе, включающего в себя корпус (10) двигателя, коленчатый вал (20), который выполнен с возможностью вращения вокруг оси коленчатого вала, цилиндр (30), расположенный внутри корпуса (10) двигателя, поршень (35), расположенный внутри цилиндра (30) и совершающий возвратно-поступательное перемещение вдоль оси возвратно-поступательного перемещения между удаленным от коленчатого вала (20) положением верхней мертвой точки (ВМТ) и приближенным к коленчатому валу (20) положением нижней мертвой точки (НМТ) и функционально соединенный с коленчатым валом так, что поршень (35) при возвратно-поступательном перемещении сообщает коленчатому валу (20) вращательное перемещение, камеру (37) сгорания, заданную внутри цилиндра (30) между корпусом (10) двигателя и головкой (35) поршня напротив коленчатого вала (20), впускной клапан (40.1), выпускной клапан (45.1), водородный инжектор (60), выполненный для непосредственного впрыска водорода в камеру (37) сгорания, водный инжектор (70), выполненный для непосредственного впрыска воды в камеру (37) сгорания, искровую или калильную свечу (50), а также блок управления двигателем, выполненный для осуществления шагов способа, причем способ включает в себя на каждом четырехтактном цикле шаги:

А) впрыска в камеру (37) сгорания посредством водородного инжектора (60) водорода на третьей фазе распределения от  $180^\circ$  до  $100^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия,

5 Б) впрыска в камеру (37) сгорания посредством водного инжектора (70) воды на второй фазе распределения от  $110^\circ$  до  $90^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия, и

В) впрыска в камеру (37) сгорания посредством водородного инжектора (60) водорода на первой фазе распределения от  $20^\circ$  до ВМТ во время такта сжатия до  $20^\circ$  после ВМТ.

10

10. Способ эксплуатации поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по п. 9, причем количеством водорода, впрыскиваемым на третьей фазе распределения, на шаге А) управляют так, что он составляет от 5 до 50 % по массе от общего количества водорода, причем общее количество водорода представляет собой  
15 сумму количеств водорода, впрыскиваемых на первой и третьей фазах распределения.

20 11. Способ эксплуатации поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по п. 9 или п. 10, также включающий в себя шаг:

Г) впрыска в камеру (37) сгорания посредством водного инжектора (70) воды на фазе распределения от  $180^\circ$  до  $110^\circ$  перед ВМТ во время такта сжатия.

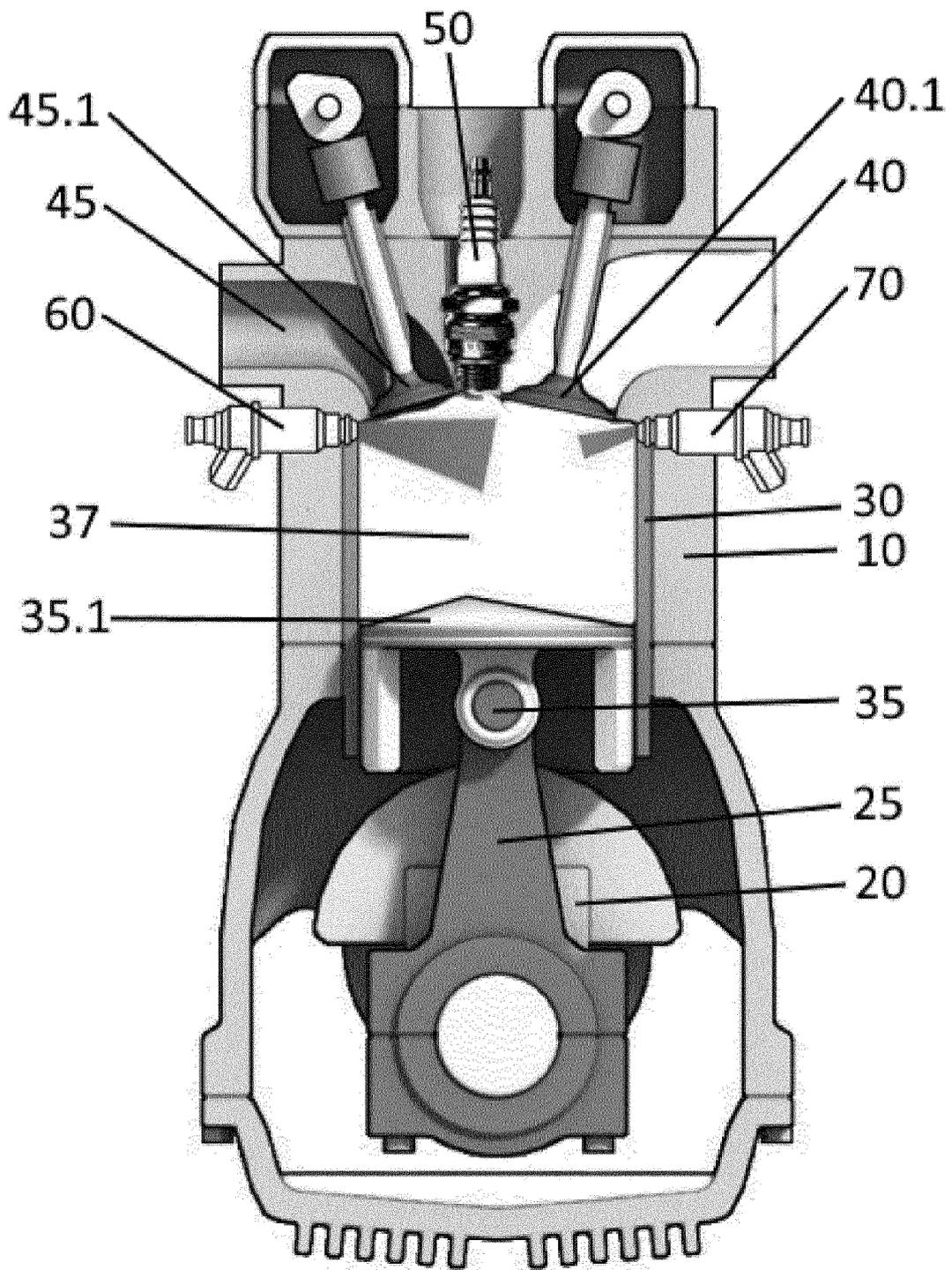
25 12. Способ эксплуатации поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по одному из п.п. 9-11, причем количеством воды, впрыскиваемым на четвертой фазе распределения, управляют так, что он составляет от 0,5 до 5 % по массе от общего количества воды, и причем общее количество воды представляет собой  
30 сумму количеств воды, впрыскиваемых на второй и четвертой фазах распределения.

13. Способ эксплуатации поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по одному

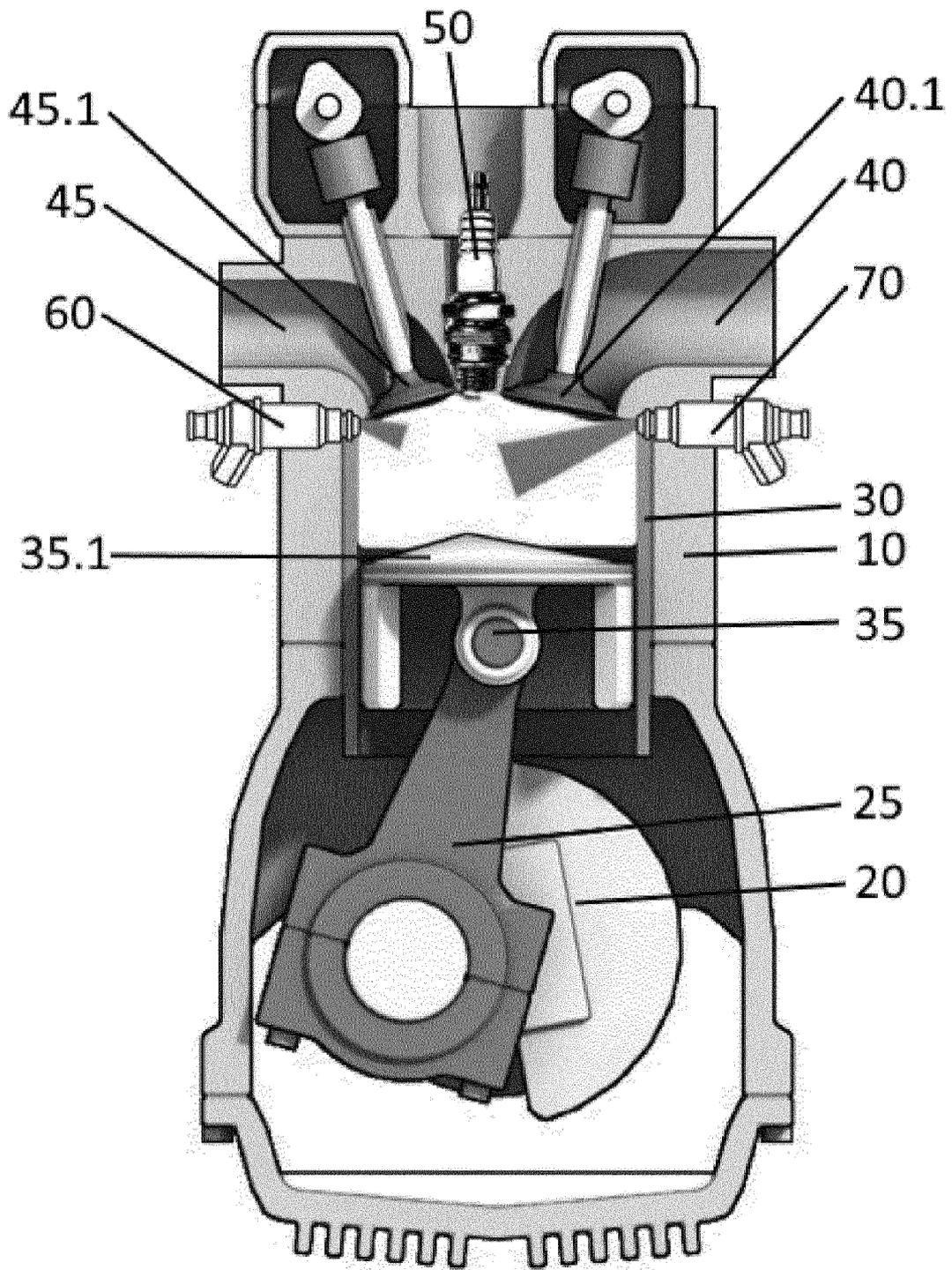
из п.п. 9-12, причем общим количеством водорода и количеством воды, впрыскиваемым на второй фазе распределения, или общим количеством воды управляют для получения значения лямбда в диапазоне 1,5-2,5, предпочтительно 1,6-2,4, более предпочтительно 1,7-2,3, и причем значение лямбда представляет собой коэффициент эквивалентности воздуха к топливу.

14. Способ эксплуатации поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по одному из п.п. 9-13, причем общим количеством водорода и общим количеством воды управляют для получения массового отношения воды к водороду, составляющего 1,0-2,0, предпочтительно 1,3-1,9, более предпочтительно 1,5-1,7.

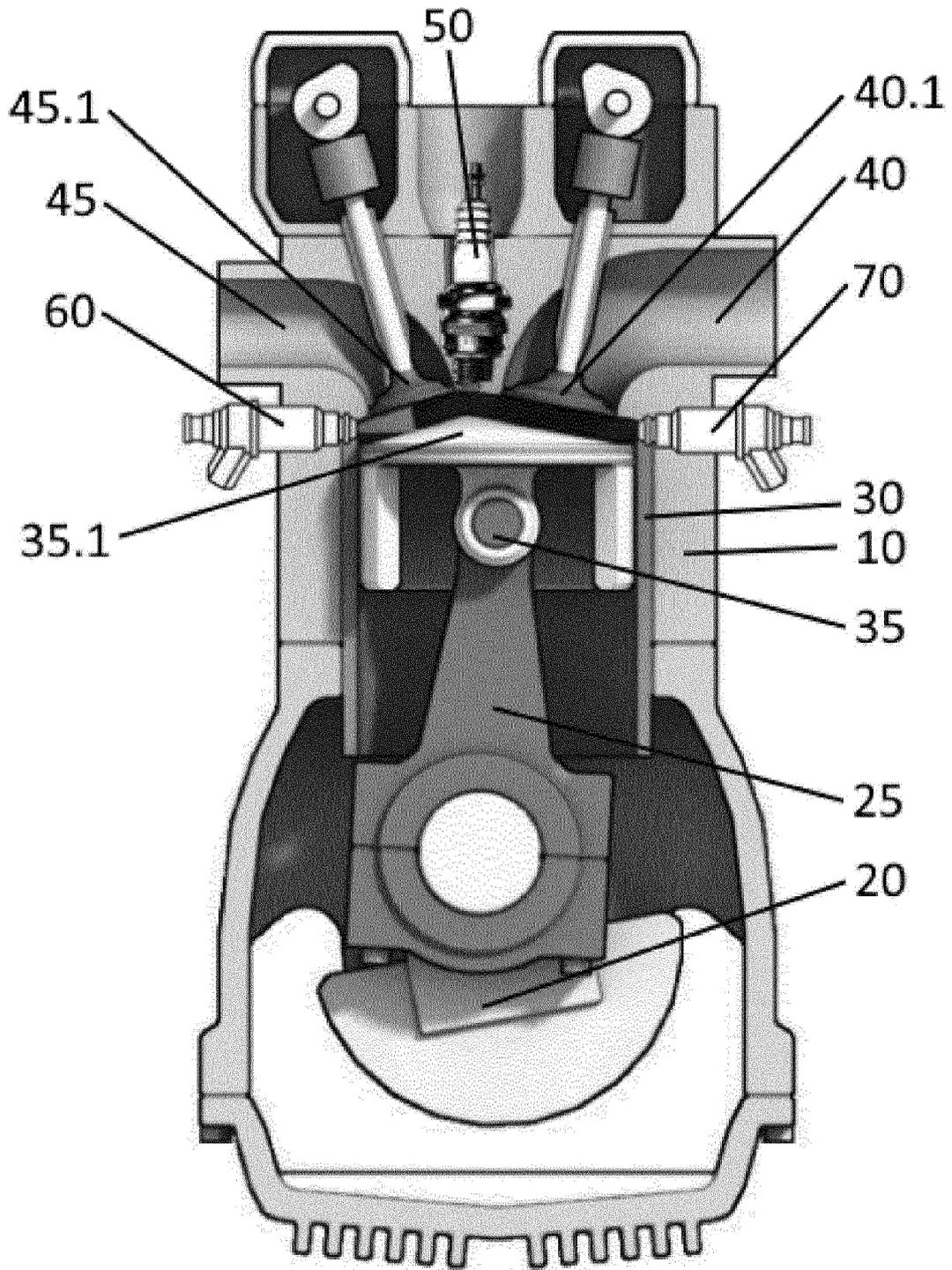
15. Способ эксплуатации поршневого четырехтактного двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием на водородном топливе по одному из п.п. 9-14, причем на шаге А) третью фазу распределения впрыска водорода задают от  $175^\circ$  до  $120^\circ$  до ВМТ во время такта сжатия и/или на шаге В) первую фазу распределения задают от  $15^\circ$  до ВМТ во время такта сжатия до  $15^\circ$  после ВМТ и/или на шаге Б) вторую фазу распределения задают от  $105^\circ$  до  $95^\circ$ , предпочтительно приблизительно  $100^\circ$ , до верхней мертвой точки (ВМТ) во время такта сжатия и/или четвертую фазу распределения, если применимо, задают от  $175^\circ$  до  $120^\circ$  до ВМТ во время такта сжатия.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3