

## НОВЫЙ СПОСОБ И УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ ГАЗООБМЕНОМ В ДИЗЕЛЕ С ГАЗОТУРБИНЫМ НАДДУВОМ

*Е.А. Лазарев, А.Н. Помаз, А.Ю. Салов*

Рассматриваются основные требования к транспортным дизелям. Дается оценка необходимости применения регулируемого газотурбинного наддува, промежуточного охлаждения наддувочного воздуха, рециркуляции отработавших газов и управления этими функциями. Предлагается совмещение всех функций управления газообменом в дизеле реализовать в одном устройстве. Описывается принцип и режимы работы предлагаемого устройства.

*Ключевые слова:* двигателестроение, дизель, газотурбинный наддув, эжектор, рециркуляция.

Среди основных требований, предъявляемых к современным транспортным дизелям, важнейшими являются: достижение высокой мощности, топливной экономичности и удовлетворение растущих экологических норм. Эти требования могут быть выполнены путем применения газотурбинного наддува, обеспечивающего повышение давления, а следовательно, и плотности воздуха на входе в цилиндр. С ростом давления наддува становится все более актуальным охлаждение наддувочного воздуха. При сжатии в компрессоре температура воздуха увеличивается тем больше, чем выше степень повышения давления и ниже КПД компрессора, и обычно составляет 70...130 °С и более.

При высоких давлениях наддува снижение повышенной температуры воздуха после компрессоров становится просто неизбежным. Промежуточное охлаждение наддувочного воздуха между компрессором и впускным коллектором дизеля дополнительно способствует повышению плотности воздуха и массового наполнения цилиндров, мощности, топливной экономичности на всех эксплуатационных режимах работы, снижению выбросов вредных веществ, температуры отработавших газов перед турбиной и теплонапряженности деталей.

Помимо высокого наддува в сочетании с промежуточным охлаждением, большое значение для снижения выбросов вредных веществ имеет применение рециркуляции отработавших газов. Рециркуляция отработавших газов в степени, не влияющей на топливную экономичность, позволяет снизить выбросы оксидов азота. Она осуществляется с использованием промежуточного охлаждения отработавших газов и электронного управления устройствами перепуска.

Регулируемый газотурбинный наддув, промежуточное охлаждение наддувочного воздуха, рециркуляция отработавших газов, промежуточное охлаждение рециркулируемых отработавших газов и использование энергии отработавших газов составляют суть газообмена в дизеле. Управление газообменом необходимо для повышения топливной экономичности, удельной мощности и совершенствования эксплуатационных свойств (повышение ресурса, обеспечение многотопливных качеств, снижение вибрации, шума, выбросов вредных веществ отработавшими газами, тепловой и механической нагруженности элементов) дизеля при работе на различных режимах. Управление газообменом в дизелях с газотурбинным наддувом осуществляется регулированием турбокомпрессора для изменения параметров наддувочного воздуха, степени рециркуляции и температуры рециркулируемых (перепускаемых во впускной коллектор) отработавших газов.

При работе дизеля с нерегулируемым турбокомпрессором по внешней скоростной характеристике наблюдается снижение давления наддува и, как следствие, расхода воздуха, что является причиной недостаточного повышения вращающего момента, помпажа компрессора, повышенных выбросов вредных веществ, температуры отработавших газов и тепловой нагруженности элементов кривошипно-шатунного механизма при уменьшении частоты вращения коленчатого вала. Поэтому при уменьшении частоты вращения коленчатого вала необходимо обеспечить либо сохранение давления наддувочного воздуха, либо его повышение для достижения постоянной мощности.

Выбор способа регулирования элементов турбокомпрессора определяется требованиями, предъявляемыми к дизелю, его конструктивными особенностями и условиями работы. Регулирование дросселированием воздуха на входе в компрессор или газа на входе в турбину, перепуском части сжатого воздуха в атмосферу, на вход компрессора или турбины или части газа перед турбиной (байпасный перепуск) неэффективны из-за потерь энергии в дросселирующих устройствах, на сжатие неиспользуемого воздуха или с перепускаемым газом. Тем не менее, в связи с относительной простотой исполнения, байпасное регулирование турбины турбокомпрессора получило наибольшее распространение в транспортных дизелях.

Регулирование компрессора поворотными лопатками во входном устройстве и в лопаточном диффузоре, турбины – поворотными лопатками соплового аппарата и турбокомпрессора, турбина которого имеет поворотные лопатки соплового аппарата, а компрессор – поворотные лопатки диффузора, эффективно, но сложно для автоматического регулирования, конструктивного исполнения и обеспечения надежной работы.

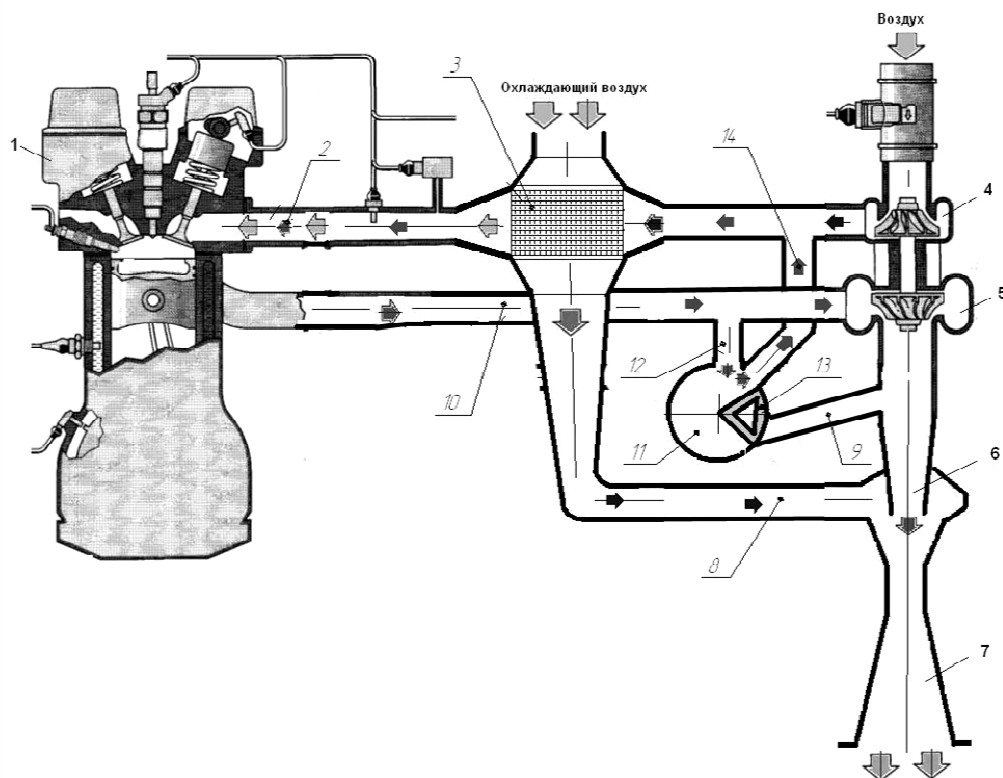
Управление газообменом включает реализацию ряда функций: осуществление рециркуляции отработавших газов во впускной коллектор, перепуск отработавших газов помимо турбины турбокомпрессора, охлаждение наддувочного воздуха и отработавших газов, создание потоков теплоотводящих сред и т. п. Для управления газообменом в современных дизелях используется множество достаточно сложных устройств: перепускные клапаны при байпасном регулировании турбины и рециркуляции отработавших газов на впуск дизеля, теплообменные аппараты при охлаждении наддувочного воздуха и рециркулируемых отработавших газов, насосы, вентиляторы и эжекторы при создании потоков жидкости или воздуха, отводящих теплоту от теплообменных аппаратов. Эти устройства располагаются на дизелях и существенно усложняют конструкцию в связи с необходимостью размещения и управления ими с помощью электро-, гидро-, пневмо- или механического привода. Одной из важнейших задач является совмещение различных функций управления газообменом в возможно меньшем числе устройств.

Новый способ управления газообменом и устройство для его осуществления (рис. 1) позволяют обеспечить совмещение функций эжекционного охлаждения наддувочного воздуха и байпасного регулирования турбины турбокомпрессора. Способ управления газообменом в дизеле с газотурбинным наддувом включает байпасное регулирование турбины турбокомпрессора, охлаждение наддувочного воздуха, рециркуляцию в цилиндре и эжектирование отработавших газов.

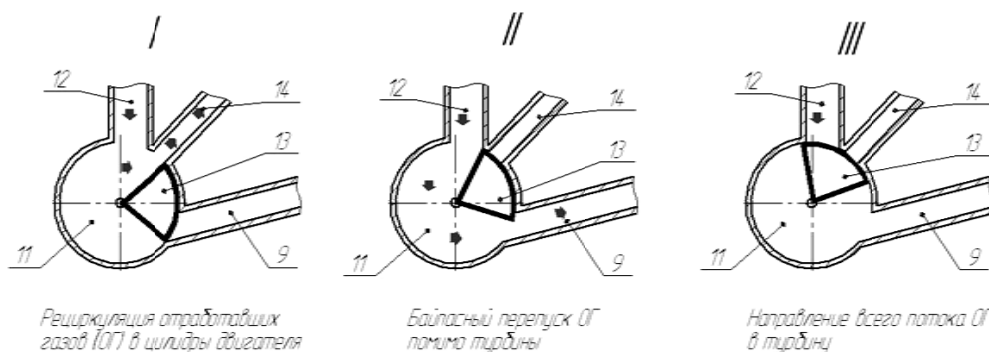
Сущность способа управления газообменом в дизеле заключается в следующем [1]. После запуска дизеля на режимах холостого хода и малых нагрузок воздушный поток из атмосферы поступает в воздухоочиститель, где очищается от загрязнений, а затем в компрессор 4. В компрессоре воздушный поток сжимается, при этом его давление и температура возрастают, и направляется в промежуточный охладитель 3 наддувочного воздуха, где происходит теплообмен между наддувочным воздухом и окружающим воздухом, циркулирующим через охладитель. Циркуляция окружающего воздуха осуществляется за счет эжекционного эффекта, создаваемого истечением части отработавших газов через сопло эжектора. После охлаждения в промежуточном охладителе 3 воздушный поток направляется во впускной коллектор 2 и далее в цилиндры дизеля. При этом поток отработавших газов, вышедший из цилиндров дизеля, поступает в выпускной коллектор 10 и разделяется, осуществляя байпасное регулирование турбины, на две неравные части, большая из которых поступает в корпус турбины 5 турбокомпрессора, а меньшая - в подводящий патрубок 12 устройства, регулирующего направление движения частей потока отработавших газов. При этом регулирующий орган находится в положении I (рис. 1), при котором меньшая часть потока отработавших газов поступает через рециркуляционный канал 14 во впускной коллектор 2 и далее в цилиндры дизеля, осуществляя, таким образом, процесс рециркуляции рабочего тела.

С ростом нагрузки (режимы средних и номинальных нагрузок) регулирующий орган переходит в положение II, перекрывая рециркуляционный канал 14, и открывая канал байпасного перепуска отработавших газов помимо турбины 9, тем самым осуществляя регулирование турбины.

При дальнейшем увеличении нагрузки (режим перегрузок) дизеля регулирующий орган переходит в положение III, направляя весь полный поток отработавших газов в турбину и после нее в эжектор.



*Положение регулирующего органа распределителя на различных режимах работы дизеля*



**Рис. 1.** Схема системы управления газообменом в дизеле: 1 – дизель, 2 – впускной коллектор, 3 – охладитель наддувочного воздуха (ОНВ), 4 – компрессор, 5 – турбина, 6 – эжектор, 7 – диффузор эжектора, 8 – воздуховод после ОНВ на входе эжектора, 9 – канал байпасного перепуска отработавших газов помимо турбины, 10 – выпускной коллектор, 11 – трехпозиционный распределитель газовых потоков, 12 – соединительный трубопровод, 13 – регулирующий орган распределителя 14 – рециркуляционный трубопровод

В разработанном способе для охлаждения наддувочного воздуха использована система, в которой циркуляция атмосферного воздуха через охладитель осуществляется с помощью эжектора – газодинамического устройства, работающего за счет использования энергии отработавших газов. Схема эжектора представлена на рис. 2. Эжектор осуществляет передачу кинетической энергии отработавших газов, движущихся с высокой скоростью, к атмосферному воздуху. В соответствии с законом Бернулли поток отработавших газов создает в сужающемся сечении эжектора пониженное давление, что вызывает подсос в газовый поток атмосферного воздуха. Смесь газового потока с атмосферным воздухом удаляется из всасывающей камеры энергией отработавших газов. Эжекционное устройство состоит из сопла, всасывающей камеры и диффузора. В сопле поток отработавших газов разгоняется, он называется рабочей средой. Эта среда движется с достаточно большой скоростью и турбулентно, из-за чего во всасывающей камере создается разрежение. Под действием разрежения создается смесь воздуха и отработавших газов, которая в последствии удаляется из всасывающей камеры в диффузор. В диффузоре происходит превращение

кинетической энергии в потенциальную энергию. Таким образом, происходит восстановление давления за счет снижения скорости смеси.

Отработавшие газы через патрубок S поступают в сопло N, формирующее высокоскоростную струю. Проходя по соплу Лавали V, смесь газов понижает давление в камере C, в которую при этом через впускное отверстие I засасывается атмосферный воздух, прошедший через охладитель. Под действием разряженного воздуха, созданная смесь удаляется из рабочей камеры через выпускное отверстие D.

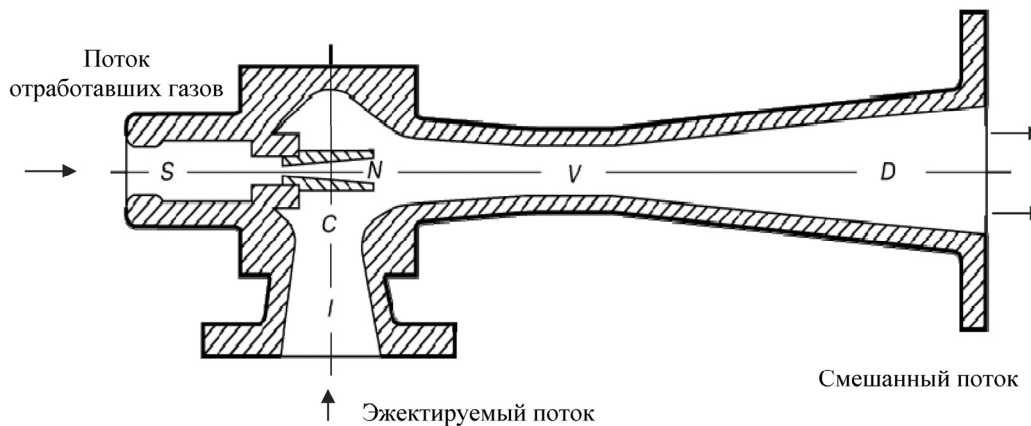


Рис. 2. Принципиальная схема эжектора

Поток, создающий разрежение (движется через сопло N), называется рабочим или эжектирующим, а всасываемый поток (поступающий в приемную камеру C) является эжектируемым. Процесс эжекции заключается в передаче кинетической энергии от рабочего потока к эжектируемому путем смешения. При этом параметры составляющих смесь потоков выравниваются. Поток, движущийся в диффузоре D, называется смешанным.

Процессы, протекающие в элементах эжектора, описываются тремя основными законами газодинамики [2].

Закон сохранения массы

$$G_c = G_p + G_n, \quad (1)$$

где  $G_p$ ,  $G_n$ ,  $G_c$  – массовые расходы рабочего, эжектируемого и смешанного потоков, кг/с.

Закон сохранения энергии:

$$h_p + u h_n = (1 + u) h_c, \quad (2)$$

где  $h_p$ ,  $h_n$ ,  $h_c$  – энтальпии рабочего, эжектируемого и смешанного потоков, кДж/кг;  $u = G_n/G_p$  – коэффициент эжекции, т. е. отношение массового расхода эжектируемого потока к массовому расходу рабочего потока;

Закон сохранения импульса. Импульс потока в любом сечении:

$$I = Gw + pf, \quad (3)$$

где  $G$  – массовый расход, кг/с;  $w$  – скорость, м/с;  $p$  – давление, Па;  $f$  – площадь сечения, м<sup>2</sup>.

Отработавшие газы, истекающие через сопло с большой скоростью во всасывающую камеру эжектора, увлекая за собой атмосферный воздух, создают непрерывный его поток через охладитель наддувочного воздуха. Не имея вращающихся деталей, система эжекционного охлаждения обеспечивает высокую эксплуатационную надежность. Такая система автоматически приспосабливается к температуре окружающего воздуха, обладает простотой конструкции и отсутствием подвижных деталей. Использование эжекционной системы охлаждения сопровождается разбавлением отработавших газов воздухом и снижению их температуры, в результате чего улучшаются экологические показатели. Эжекционная система охлаждения наддувочного воздуха снижает потери мощности дизеля на функционирование системы газообмена.

Новый способ управления газообменом позволяет использовать энергию части потока отработавших газов для осуществления циркуляции окружающего воздуха через промежуточный охладитель наддувочного воздуха совмещением функций байпасного регулирования турбины турбокомпрессора и эжекционного охлаждения при прекращении рециркуляции отработавших газов

## Краткие сообщения

---

в цилиндр. При последующем прекращении байпасного регулирования турбины данный способ управления позволяет использовать энергию полного потока отработавших газов после турбины для осуществления циркуляции окружающего воздуха через промежуточный охладитель наддувочного воздуха в процессе его эжекционного охлаждения.

### *Литература*

1. Пат. 2301899 Российская Федерация, МПК F 02 В 37/12. Способ и устройство управления газообменом в дизеле с газотурбинным наддувом / Е.А. Лазарев, А.А. Малоземов, В.Н. Бондарь, М.А. Казанцев, В.Е. Лазарев. – № 2006100153/06; заявл. 10.01.2006; опубл. 27.06.2007, Бюл. № 20.
2. Соколов, Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.

**Лазарев Евгений Анатольевич.** Доктор технических наук, профессор кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск). Область научных интересов – рабочие процессы в поршневых двигателях с газотурбинным наддувом. E-mail: lea2@mail.ru

**Помаз Андрей Николаевич.** Аспирант кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск). Область научных интересов – рабочие процессы в поршневых двигателях с газотурбинным наддувом. E-mail: s-1190@mail.ru

**Салов Андрей Юрьевич.** Аспирант кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск). Область научных интересов – рабочие процессы в поршневых двигателях с газотурбинным наддувом. E-mail: a007007@mail.ru

---

## A NEW METHOD AND CONTROL DEVICE OF GAS EXCHANGE AT A SUPERCHARGED DIESEL ENGINE

*E.A. Lazarev, A.N. Pomaz, A.Y. Salov*

The basic requirements for transport diesel engines. An assessment of the need for a exhaust gas turbocharging control, charge air cooling and exhaust gas recirculation and the management of these functions. Proposed to combine all the control functions in diesel gas exchange to implement in a single device. Describes the principles and modes of operation of the device.

*Keywords: engine manufacturer, diesel, turbo, blower, recycling.*

**Evgeny A. Lazarev.** Doctor of engineering sciences, professor of the Internal Combustion Engines department, South Ural State University (Chelyabinsk). Professional interests – work processes in piston engines with supercharging. E-mail: lea2@mail.ru

**Andrey N. Pomaz.** Postgraduate student of the Internal Combustion Engines department, South Ural State University (Chelyabinsk). Professional interests – work processes of supercharged reciprocating piston engines. E-mail: s-1190@mail.ru

**Andrey Y. Salov.** Postgraduate student of the Internal Combustion Engines department, South Ural State University (Chelyabinsk). Professional interests – work processes of supercharged reciprocating piston engines. E-mail: a007007@mail.ru

*Поступила в редакцию 28 февраля 2013 г.*