

УДК 621.431

М.Ю. Ушаков

## ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ПОКАЗАНИЙ ДАТЧИКА МАССОВОГО РАСХОДА ВОЗДУХА В КОРОТКОМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ТРАКТЕ ДВС

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева*

Исследованы конструктивные мероприятия по структурированию воздушного потока измерительного тракта ДВС при применении датчика массового расхода воздуха. Показано, что в условиях ограниченной протяжённости пространства перед датчиком требуется принятие специальных мер, призванных обеспечить достоверность измерений.

**Ключевые слова:** датчик массового расхода воздуха, нестабильность показаний, формирователь потока.

Традиционное измерение расхода воздуха в автомобильных ДВС производится с помощью специальных датчиков, в частности – датчиков массового расхода воздуха (ДМРВ). Чаще всего по принципу действия эти датчики – термоанемометры, в которых чувствительный элемент – нагретая металлическая нить, либо аналог нити – плёнка на подложке. Имеем и устоявшееся название – плёночный датчик (hot film sensor).

Безграничная вера в технический прогресс и здравый смысл неоднократно ставили вопрос: сможет ли на порядок более медленный плёночный датчик, к тому же имеющий заметно меньшую точность значительно потеснить или даже полностью заменить датчик с нитью? Оказалось – да. И главная, на наш взгляд, причина – стойкое убеждение, что невозможно сделать вибростойкий датчик с нитью. Со временем для повышения точности предсказания циклового заряда воздуха к «дешёвому» ДМРВ дополнительно потребовался электропривод дроссельной заслонки. Удивительно, но и это сомнительное решение, снижающее надёжность и безопасность выглядит как навязанное, однако признано мировым сообществом единственно правильным (на наш взгляд в основном из-за универсальности). Снижение надёжности и безопасности компенсировалось дополнительными техническими решениями и повышенными требованиями. В конечном итоге за всё заплатит конечный потребитель, только насколько это правомерно?

В статье речь пойдёт об исследовании работы плёночного ДМРВ в условиях отличных от проверенных заводских конструкций впускного тракта. Материал статьи может быть интересен специалистам в области двигателестроения, а также широкому кругу автомобилистов, желающих иметь более широкие представления о работе бензинового двигателя.

Нынешняя философия «автомобиль на пять лет, потом – в утиль» устраивает не всех, поэтому добротный сделанный автомобиль 20-30-летней давности вызывает восхищение не только у коллекционеров, но и у специалистов и просто любителей автотехники. Распространенная в то время система механического впрыска (KE-Jetronic) зарекомендовала себя не с лучшей стороны с точки зрения долговечности, диагностирования и ремонта. Одним из вариантов решения проблем архаичной системы является её полная замена на систему электронного впрыска. Блок управления (БУ) может быть подобран из каких-либо штатных с соответствующим числом цилиндров. Программа БУ должна позволять вносить некоторые коррективы в текущие настройки/комплектацию системы. В нашем случае использовался полностью самодельный БУ с оригинальными алгоритмами управления с числом цилиндров из ряда 4/6/8, созданный автором статьи для исследовательских целей [1-3].

При замене системы впрыска KE-Jetronic на классический электронный впрыск в частности необходимо установить должным образом датчик массового расхода воздуха

(ДМРВ), с помощью которого практически непосредственно определяется цикловой заряд воздуха, а вместе с ним и цикловая подача топлива форсунками.

Альтернативный способ определения циклового заряда воздуха по величине давления в ресивере и температуре впускного воздуха требует наличия в арсенале разработчика чрезвычайно сложной математической модели, которая бы учитывала разнообразные конструктивные особенности реконструируемых двигателей, и которой у нас попросту нет. Кроме того, даже имея такую модель, потребовалась бы длительная её настройка-откатка, что для конкретного владельца автомобиля является, по меньшей мере, неудобным мероприятием. Поэтому использование ДМРВ представляется для нас реальным универсальным решением.

Итак, установка в воздушном тракте двигателя ДМРВ – это конструкторская задача, которая обычно не встречает принципиальных трудностей и решается выбором подходящего по максимальному расходу воздуха датчика, перекомпоновкой элементов подачи воздуха – прокладкой нового воздуховода и заменой корпуса воздушного фильтра. Однако мы столкнулись с ситуацией, когда ряд проблем усугубляет друг друга. Речь идёт о двигателе M117 V8 с рабочим объёмом 5.6 л в составе автомобиля Mercedes Benz 560SEL, кузов W126. Так замена корпуса воздушного фильтра оказалась бы бесполезной, поскольку не дала бы выигрыша в пространстве для ДМРВ. Из-за весьма внушительных габаритов «родного» корпуса найти достойную замену «чужого» исполнения представлялось просто невероятным. Располагаемое пространство от выхода воздушного фильтра до дроссельного патрубка оказалось весьма скромным, а датчик требовался на большой расход воздуха. Подобрать ДМРВ с учётом необходимых требований не представлялось возможным, поскольку даже датчик с вдвое меньшим максимальным расходом едва умещался в предполагаемом для него месте.

Для выполнения поставленной задачи потребовалось применить довольно дерзкое решение. Заново изготовлен цилиндрический в основной части воздуховод, соединяющий выход воздушного фильтра с дроссельным патрубком. В воздуховод установлен чувствительный элемент, вынутый из штатного ДМРВ, а вслед за ним, как полагается, пристыкованы патрубки забора воздуха в регулятор дополнительного воздуха (РДВ) и атмосферной ветви вентиляции картера. Площадь сечения воздуховода соответствует штатным ДМРВ на максимальный расход не менее 1000 кг/ч, что требуется в нашем проекте. Разумеется, тарировка «нового» датчика – одна из проблем, требующая решения. Вариант решения взамен обыкновенной тарировки на продувочном стенде обсуждался в [2] и в дальнейшем нашёл вполне удовлетворительное экспериментальное подтверждение на реальных автомобилях. Но как оказалось, самая очевидная проблема может оказаться не самой важной. Самым же важным являлся и является вопрос стабильности (читай - верности) показаний расхода воздуха в реальных условиях работы двигателя.

Первые пуски двигателя с модернизированной системой выявили временами нестабильную работу на режиме холостого хода. Обычно разброс от замера к замеру составлял до 12% от минимума до максимума (один период измерений – пол-оборота коленвала). На рис. 1 показаны осциллограммы ряда параметров, когда наблюдался небольшой разброс измеренного значения расхода воздуха. Далее прокомментируем графики. При вращении двигателя в нашем БУ в энергонезависимой памяти непрерывно сохраняется более 40 параметров. Самые свежие данные записываются на место самых старых. Ёмкости микросхемы памяти хватает на пробег автомобиля от 20 до 70 км.

После остановки двигателя и скачивания содержимого этой памяти в компьютер получаем картину последних событий в ДВС. Располагаемый инструментарий аналогичен бортовому самописцу в самолётах и в нашем обиходе стойко утвердился термин «чёрный ящик» (ЧЯ), которым далее мы будем пользоваться. Данные ЧЯ можно просмотреть в табличном (все) или графическом виде (39 параметров). Второй вариант более нагляден.

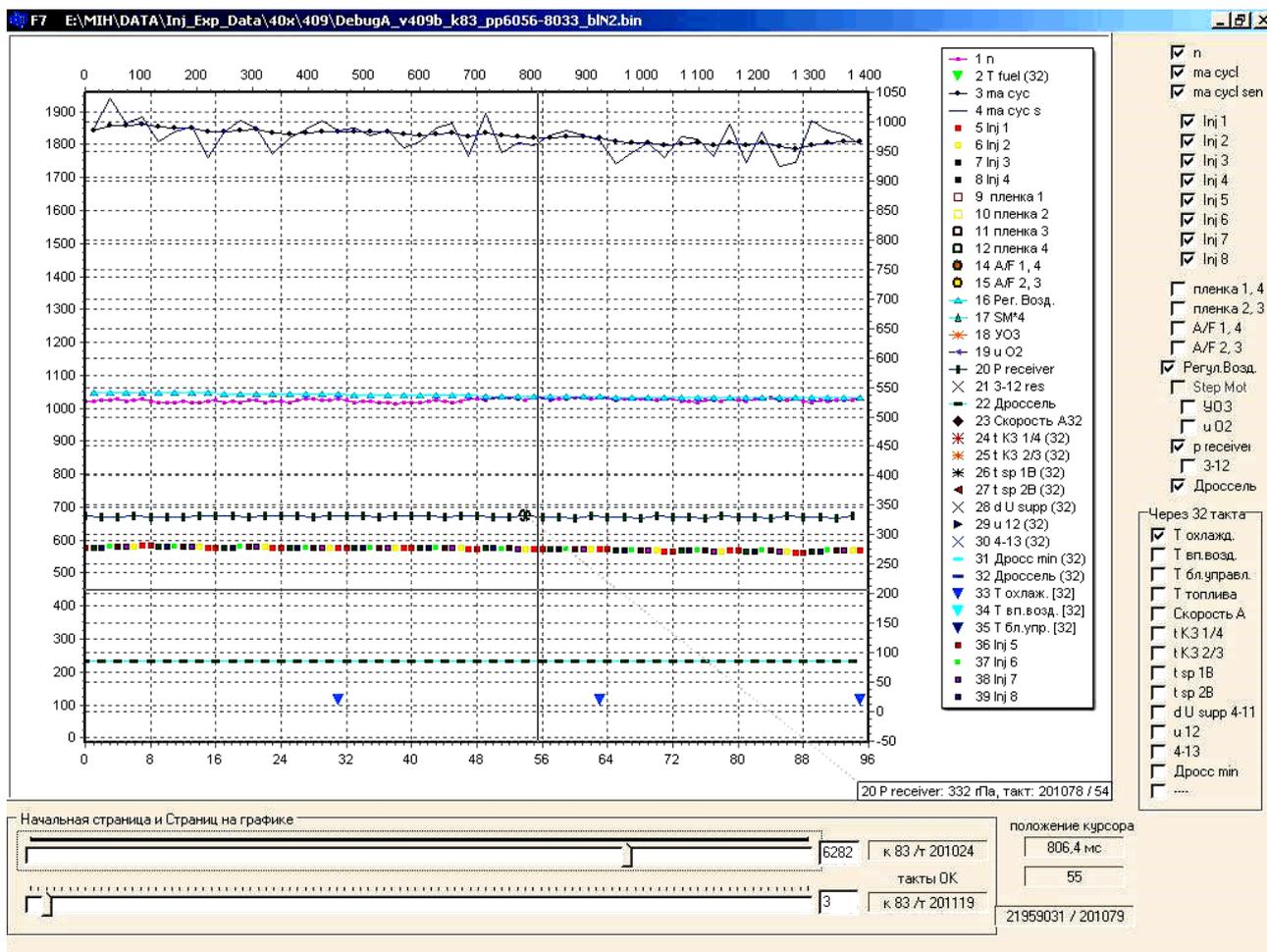


Рис. 1. Осциллограмма ряда параметров в последовательных тактах. Стр. ЧЯ 6282

Из возможных 39 параметров графически будут отображаться лишь те, у которых поставлены галочки (см. рис. 1, правая сторона), а легенда (чуть левее) подсказывает каким цветом и какими маркерами изображаются графики:  $n$  – частота вращения (сиреневый),  $ma\ cycl$ ,  $ma\ cycl\ sen$  – цикловой заряд воздуха с учетом усреднения ресивером и непосредственно с датчика,  $Inj1-Inj8$  – длительности впрыска форсунками соответствующих цилиндров,  $Регул.Возд.$  – относительная степень открытия регулятора воздуха (0-1000),  $p\ receiver$  – абс. давление в ресивере,  $Дроссель$  – сигнал с датчика положения,  $T\ охлажд.$  – температура в системе охлаждения.

Нижняя горизонтальная ось – так называемые такты, для 8-цилиндрового двигателя это четверть оборота. Крупные деления шкалы идут через 8, каждое такое деление это полный цикл – два оборота. Верхняя горизонтальная ось – вспомогательная – равномерная временная в мс. При постоянной частоте вращения реально показывает масштаб времени.

Вертикальные оси: левая – автоматически масштабируется, правая – фиксированного диапазона  $-50...+1050$ . Каждый параметр строго привязан либо к одной, либо к другой оси со своим масштабирующим коэффициентом  $10^n$ . Значение физической величины точек графика можно уточнить, направив курсор на интересующую точку и нажав левую кнопку мыши (в правом нижнем углу графика получим что-то наподобие следующего:  $20\ P\ receiver$  – номер и название переменной, её величина – 322 гПа, такты от начала круга/графика 201078/54). Более подробно о возможностях БУ и программы сопровождения можно ознакомиться в [1].

Итак, на рис. 1 наблюдаем работу двигателя на холостом ходу. Частота вращения около  $1000\ \text{мин}^{-1}$ , температура в системе охлаждения около  $20^\circ\text{C}$ . В пределах показанных 12

циклов дроссельная заслонка находится в постоянном исходном положении, длительность впрыска порядка 5,8 мс, давление в ресивере стабильно на уровне 332 гПа, положение регулятора воздуха изменяется весьма незначительно в сторону уменьшения. Цикловой расход воздуха также дрейфует в сторону уменьшения и составляет 185-180 мг/цикл (для одного цилиндра). Предельные значения циклового расхода по датчику в начале графика составили 193-179 мг/цикл, что укладывается в  $\pm 4\%$  (см. две осциллограммы в верхней части графика).

Как оказалось, показания ДМРВ временами имели большую нестабильность. Изредка наблюдались кратковременные, но достаточно глубокие провалы (до 50%). Но больше всего изумляли провалы показаний в двух-трёх последовательных циклах, которые появлялись не столь часто, но их наличие могло приводить к нарушению сгорания из-за переобеднения вплоть до остановки двигателя. На рис. 2 показан провал измеренного значения расхода воздуха с продолжительностью более двух циклов, причём два замера оказались с весьма низкими значениями (порядка 100 и 115 мг) по отношению к средней величине (около 185 мг/цикл).

Длительность впрыска была в это время значительно снижена, но из-за работы двигателя при прогреве на богатой смеси, двигатель практически этого "не заметил" - частота вращения несколько не изменилась. Фактический расход воздуха, видимо, на самом деле был неизменным, что определяется постоянством частоты вращения, практически постоянным открытием регулятора воздуха и дополнительно подтверждается постоянством измеренных значений абсолютного давления в ресивере. По мере прогрева и приведения состава смеси к нормальным величинам аналогичные коллизии с измерением расхода воздуха бесследно пройти уже не могут и, как уже было замечено, приводили к пропускам сгорания, резкому изменению частоты вращения вплоть до полной остановки.

Проанализировав записи ЧЯ, была выдвинута гипотеза о наличии нестабильности струй воздуха возле чувствительного элемента датчика. Другая гипотеза, как неисправность самого датчика, была проверена и отвергнута, поскольку простая замена на другой экземпляр показала отсутствие нужного эффекта. Нами использован не самый подходящий датчик, а при выборе доминировал принцип доступности. Мы использовали датчик, регистрирующий и обратный поток, что для двигателя с числом цилиндров более 4 совершенно бесполезно, и есть подозрения, что это определило дополнительные сложности. Выбранный датчик имеет съёмный чувствительный элемент (рис. 3), доступный жгутовой разъём и минимальную цену, поскольку производится на территории РФ.

В левой части фото виден разъём, плоскость крепления и канавка под уплотнительное кольцо. В правой части – корпусные детали образуют некоторое подобие лабиринта, в котором воздух, проходя мимо плёнки на подложке дважды меняет направление на противоположное. Первый раз поворот потока происходит в районе стабилизирующих боковых отверстий (видно - одно), а второй раз – при выходе в тени клювика. Конструкция датчика такова, что сильно искажает движение воздуха в трубопроводе, в который он вставлен. Воздух натывается на корпус датчика – по сути, поперечную стенку, в которой имеется разрыв – канал для измерительной части потока. Предположительно, эти возмущения будут оказывать влияние на измерительную часть потока, особенно, если имеет место нестабильность скорости потока в поперечном направлении.

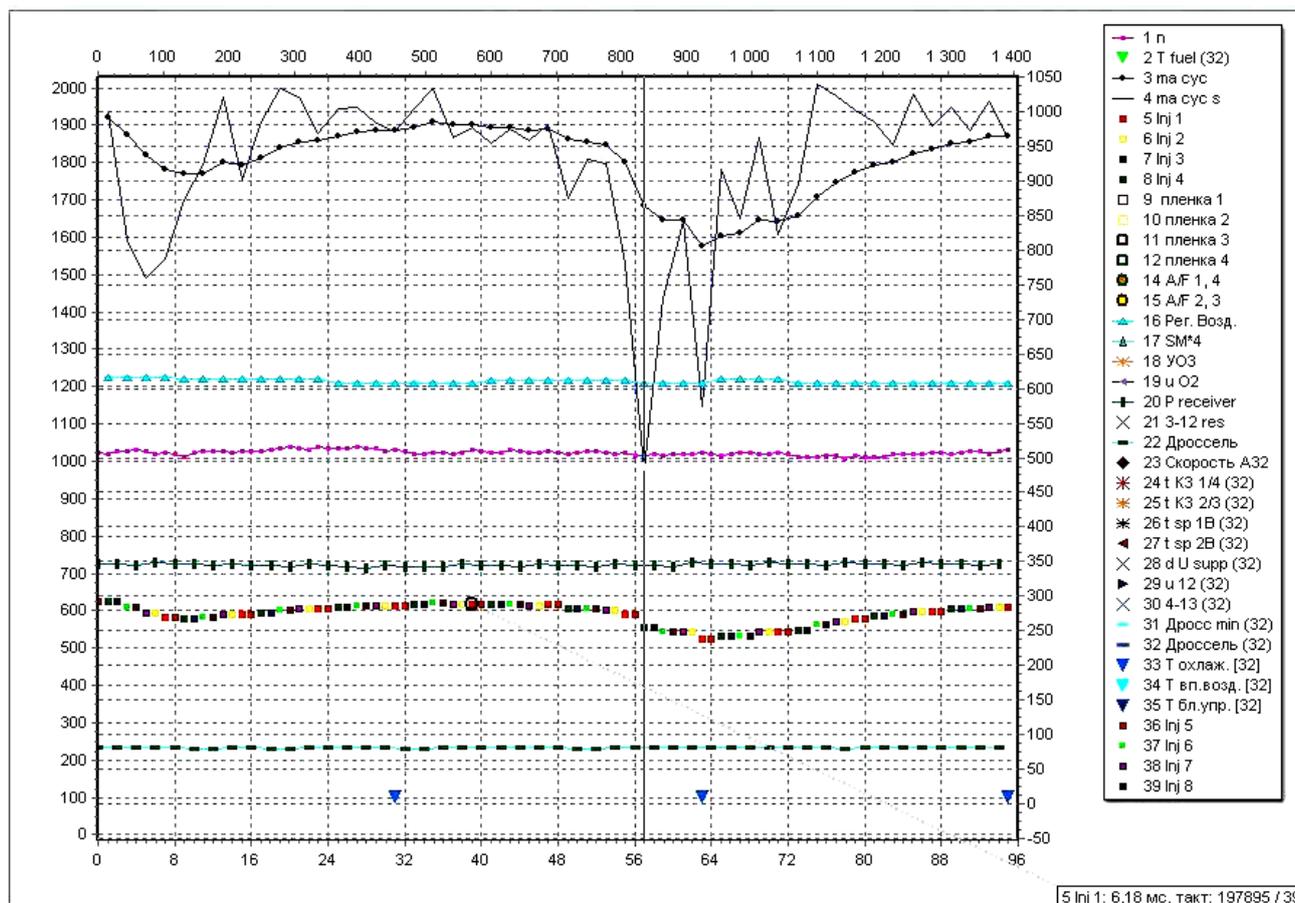


Рис. 2. Осциллограмма ряда параметров в последовательных тактах. Стр. ЧЯ 6183



Рис. 3. Применённый ДМРВ (съёмный чувствительный элемент)

Есть ещё одно обстоятельство, требующее анализа. Стабильные показания ДМРВ требуют стабильного соотношения между локальным расходом воздуха через его измерительную часть и общим расходом. Для современных плёночных датчиков это особенно актуально, поскольку, например, для нашего датчика соотношения между локальным расходом воздуха через его измерительную часть и общим расходом составляет 1 к 75. Нитяные ДМРВ имеют это соотношение существенно более выгодное – порядка 1 к 3. Одним из очевидных путей обеспечения постоянства соотношений расходов является формирование равномерно-

го струйного движения воздуха. Частично эта задача решается принятием мер формирования потока перед обрамлением датчика и лучшим вариантом является круглый прямой трубопровод возможно большей длины. Также на входе обрамления датчика часто можно встретить сотовый формирователь, призванный стабилизировать расход по сечению и успокоить поперечные перемещения потока (рис. 4).



Рис. 4. Стандартный стабилизатор потока ДМРВ

Чтобы практически проработать гипотезу о вреде поперечных перемещений воздуха было разработано устройство, которое назовём трубой-стабилизатором. За основу взят кусок стальной трубы прямоугольного сечения  $22 \times 24$  мм. На одной из граней вырезано окно, в которое вставлен датчик носовой частью (рис. 5). Воздух, попадая в трубу, не имеет возможности свободно смещаться в поперечном направлении. Тело датчика вне трубы, искажающее поток уже не в состоянии повлиять на поток воздуха, попавший в трубу-стабилизатор.

Дальнейшие эксперименты ставили задачей оценку поведения двигателя с экспериментальным и штатным стабилизаторами потока. Первые опыты пришлось на испытание трубы-стабилизатора. И поведение двигателя, и анализ записей расхода воздуха свидетельствовали о значительном улучшении в деле измерения расхода воздуха. Исчезли продолжительные провалы среднего расхода воздуха. Двигатель при мере прогрева уверенно принимал снижение заданной частоты вращения, и только при самой минимальной частоте ( $680 \text{ мин}^{-1}$ ) казалось, что ещё можно было бы что-то улучшить!

Наряду с самодельной трубой-стабилизатором был дополнительно установлен и штатный «сотовый» формирователь (рис. 4), который случайным образом подошёл нам по наружному диаметру и позволял довольно плотно вставлять его в наш воздухопровод. Работа двигателя ещё немного улучшилась. Поведение двигателя при самых низких частотах вращения субъективно было более стабильным.

Естественно задать вопрос: как будет работать двигатель только со штатным «сотовым» формирователем? У нас имеются эксперименты с двумя вариантами установки «сотового» формирователя. В первом, он располагался на расстоянии всего 13 мм от передней плоскости датчика. Во втором случае расстояние было увеличено до 70 мм, что соответствовало расстояниям в штатных условиях (у разных датчиков это расстояние несколько варьируется). Результаты экспериментов неутешительны. Оба варианта работают хуже нашей трубы-стабилизатора, а различия между ними в пользу варианта с большим расстоянием.

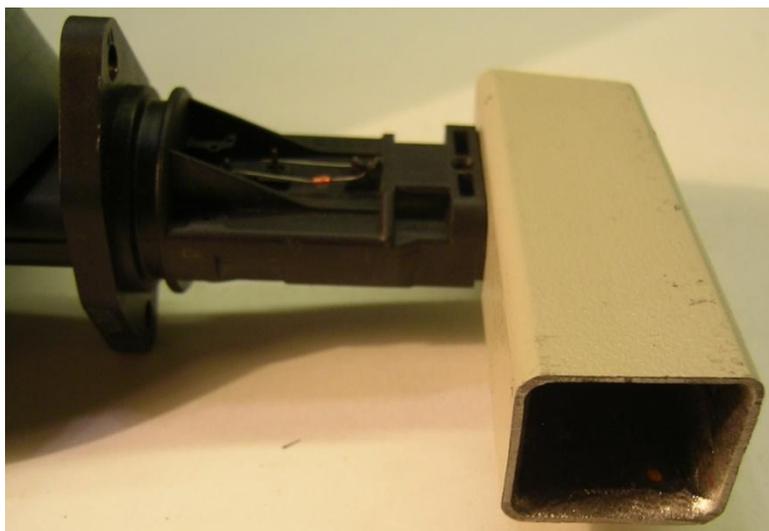


Рис. 5. Экспериментальная труба-стабилизатор

Полученные записи ЧЯ тщательно просмотрены на предмет выявления характерных дефектов при измерениях. Наш экспериментальный формователь даёт незначительные выбросы в соседних измерениях, хотя не в состоянии точно зафиксировать соотношение общего расхода с его измерительной частью. Поэтому было принято решение разработать конструкцию, обладающую свойствами стабилизации соотношения измерительной части расхода к общему, исключить поперечные перемещения воздуха, а также изолировать друг от друга струи воздуха, проходящие мимо входа и выхода измерительных каналов датчика.

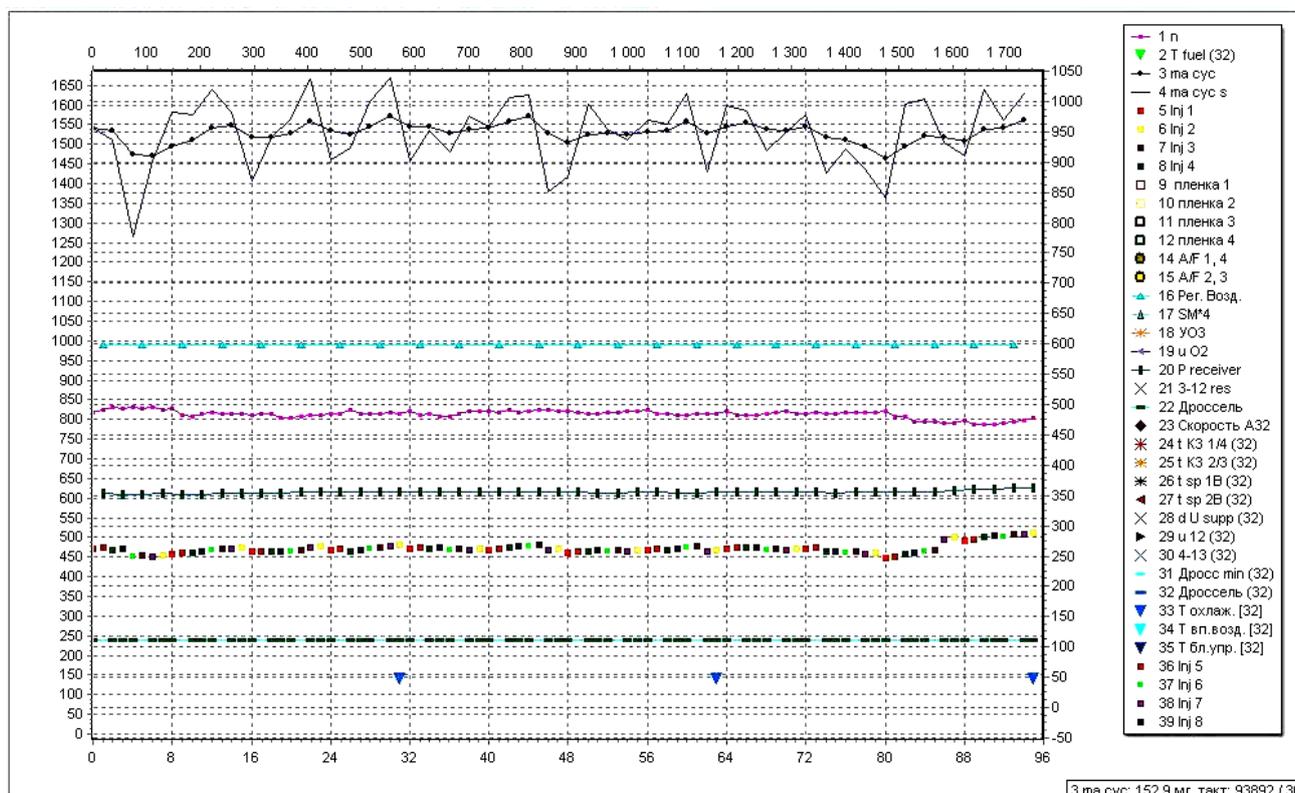


Рис. 6. Осциллограмма со штатным стабилизатором. Стр. ЧЯ 2933

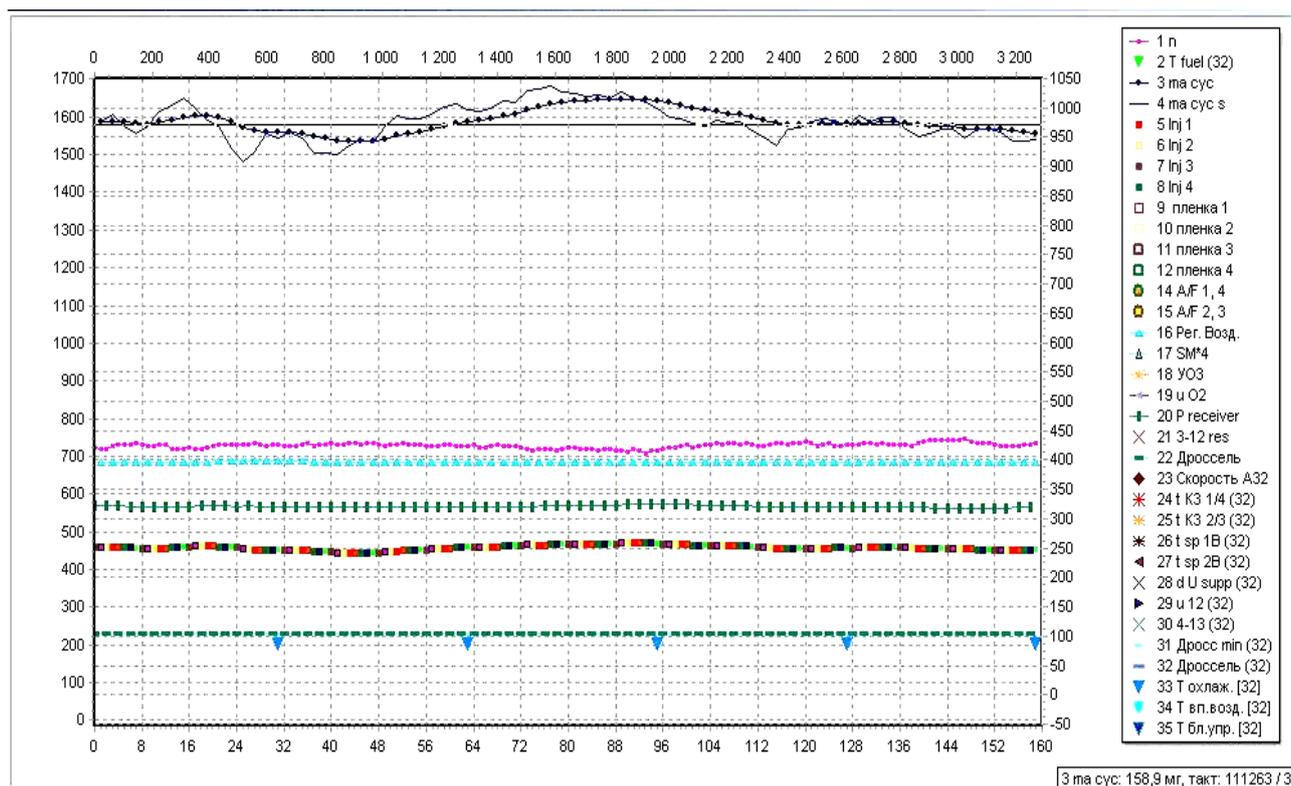


Рис. 7. Оциллограмма с экспериментальной трубой-стабилизатором. Стр. ЧЯ 3476

Новый формирователь выполнен в виде сотовой структуры, но значительно более протяженный в длину по сравнению со штатным, у которого эта длина всего лишь 7–7,5 мм. Путь воздуха по каналу формирователя перед попаданием в датчик составляет около 40 мм, общая длина – 80 мм. Размер ячейки увеличен до 9 мм и равен ширине измерительного канала датчика. Одна из сот 9×19 мм некоторую часть проходящего через неё потока подаёт в датчик, а соседняя, справа от неё, этот воздух призвана забирать (см. рис. 8). Положение перегородок подогнано под положение датчика с тем, чтобы не создавать ступеньки и прочие препятствия на пути измерительной части потока. Таким образом, возмущения потока воздуха возле входной и выходной частей датчика минимизированы, что должно благотворно отразиться на стабильности измерений в т.ч. и больших расходов. Деталь выполнена методом 3D-печати.

Для сравнения работы нового формирователя с представленными выше вариантами пролистаны многие страницы записей ЧЯ. Однако чётко сравнить разные варианты не представилось возможным. В обычных условиях любой из вариантов может демонстрировать вполне стабильное поведение, а количественные оценки будут неустойчивыми. Поэтому для сравнения была выбрана одна из самых худших реализаций, представленная на рис. 9. Аналогично фрагменты оциллограмм на рис. 6 и 7 выбраны из тех же соображений.

Итак, с экспериментальной трубой-стабилизатором на фоне среднего циклового заряда в 159 мг выбросы составили 168,2–149,9 (+5,8/–5,7%).

То же, только со штатным стабилизатором на фоне среднего 153 мг выбросы 167–127(+9,1/–17%).

То же с новым формирователем – 170 мг и 182/163(+7/–4,1%).

В дальнейшем новый формирователь ДМРВ занял постоянное место в воздуховоде и работа двигателя не вызывала нареканий, связанных с проблемами измерения расхода воздуха.

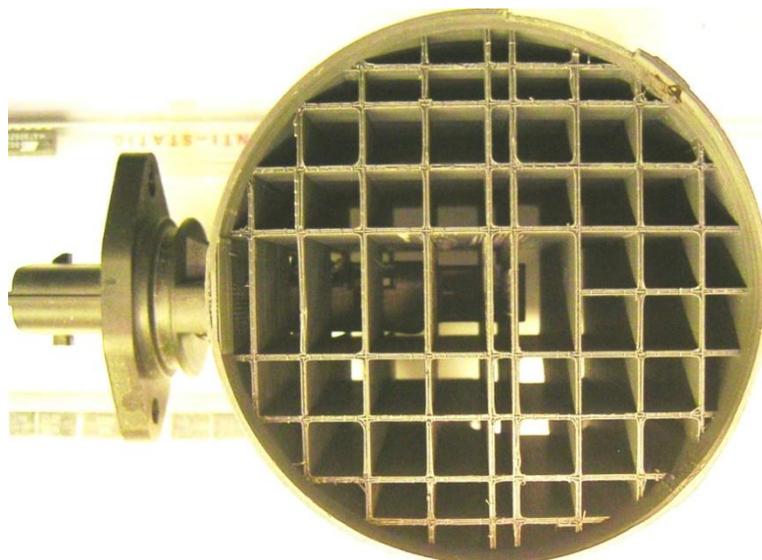


Рис. 8. Новый формирователь потока

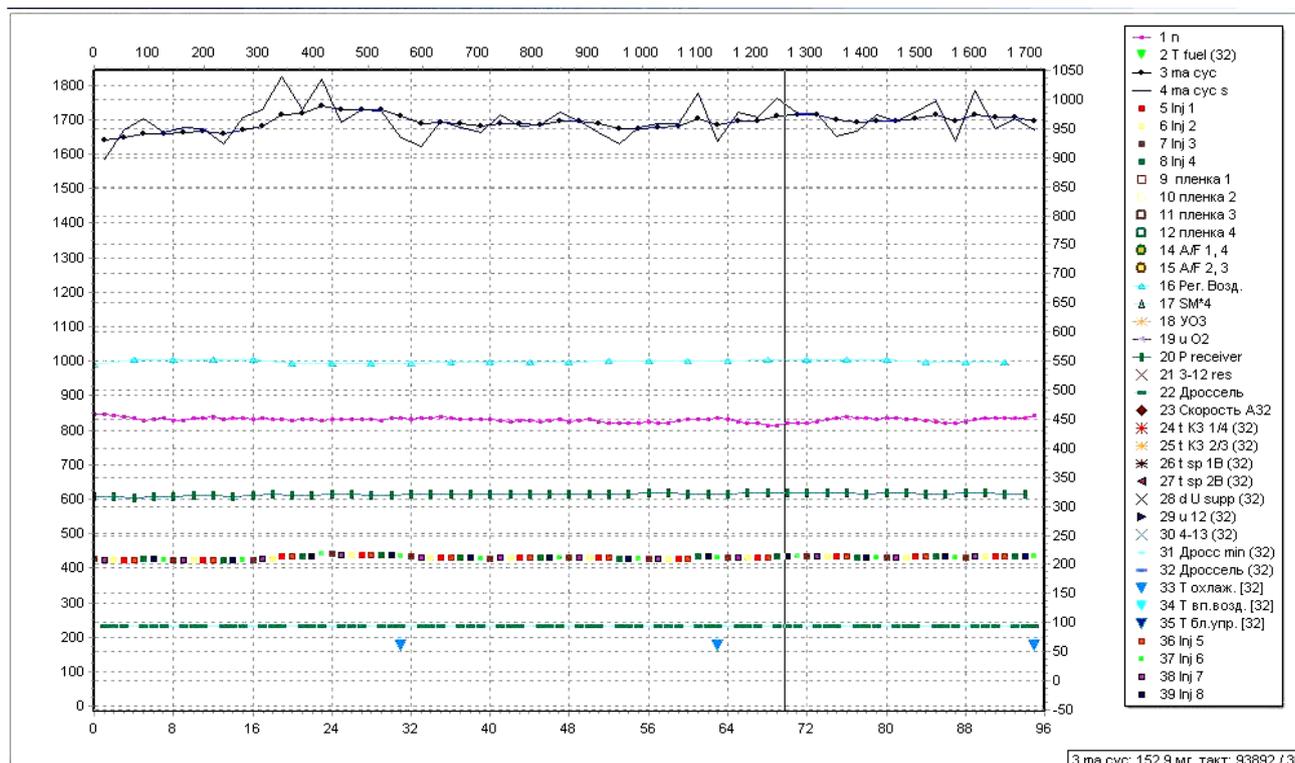


Рис. 9. Осциллограмма с новым формирователем. Стр. ЧЯ 1349

**Выводы**

1. Одного лишь штатного формирователя потока, встроенного на входе в ДМРВ недостаточно для правильной работы измерительной системы расхода воздуха. Требуется предварительное формирование потока воздуха и перед корпусом датчика.
2. Разработанный вновь формирователь потока впускного воздуха обеспечивает правильную работу измерительной системы при ограниченной длине воздуховода.

*Библиографический список*

1. Фролов, С.А. Программно-вычислительный комплекс для ДВС с искровым зажиганием, работающим на бинарном топливе [Текст] / С.А. Фролов, Л.А. Жолобов, М.Ю. Ушаков // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 1.
2. Ушаков, М.Ю. Вариант адаптации системы топливоподачи бензинового двигателя с впрыском [Текст] // Безопасность транспортных средств в эксплуатации. Материалы 79-й международной научно-технической конференции ААИ, 3-4 октября 2012 г. – Н. Новгород: НГТУ, 2012.
3. Альтернативные системы впрыска вместо KE-Jetronic. Polytronic – свое электронное управление ДВС. // Интернет-форум OLDMERIN.net [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.oldmerin.net/board/index.php?showtopic=119534> (Дата обращения 01.05.2017).