

## ДИЗЕЛИ КАМАЗ ДЛЯ ВНЕДОРОЖНОЙ ТЕХНИКИ, СООТВЕТСТВУЮЩИЕ ТРЕБОВАНИЯМ ПРАВИЛ ЕЭК ООН № 96-02

*Е.Р. Борисенков, Д.Х. Валеев, к.т.н., И.Ф. Гумеров, к.т.н., Ф.Ф. Искандаров, А.И. Карпов, А.С.Куликов, С.М. Кучев, Р.Х. Хафизов; ОАО КамАЗ, Н.А. Гатауллин, к.т.н.; КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева*

Одним из основных направлений развития ОАО КамАЗ в долгосрочной перспективе является расширение и увеличение объемов выпуска двигателей КамАЗ собственного производства, соответствующих современным требованиям по экологии, надежности, ресурсу и топливной экономичности. В статье приведены результаты исследований по обеспечению требований Правил ЕЭК ООН № 96-02 дизелями КамАЗ, предназначенными для установки на внедорожную технику. Указанные требования обеспечены за счет комплектации двигателей аккумуляторной системой топливоподачи типа CR и турбокомпрессорами типа S300G, а также оптимизации рабочих характеристик систем топливоподачи и воздухообмена. Соответствие нормам выбросов вредных веществ подтверждено результатами сертификационных испытаний нового семейства дизелей КамАЗ.

Правила 96 определяют требования к выбросам вредных веществ (ВВ) дизелей, предназначенных к установке на грузовые автомобили повышенной проходимости, тракторы, строительную, сельскохозяйственную, лесохозяйственную, дорожно-ремонтную и уборочную технику, газовые компрессоры, промышленные буровые установки, ирригационные насосы, генераторные агрегаты с переменной нагрузкой и другие виды техники внедорожного назначения. Мощностной диапазон двигателей, на которые распространяется действие Правил 96, составляет 18–560 кВт. Согласно экологической классификации автомобильной техники и двигателей внутреннего сгорания, установленной Техническим регламентом «О требованиях к выбросам автомобильной техникой, выпускаемой в обращение на территории Российской Федерации, вредных (загрязняющих) веществ», Правила ЕЭК ООН № 96-02, как нормативный документ, соответствуют экологическому классу 4.

За время действия Правил 96 ужесточение технических нормативов выбросов компонентов СО (оксид углерода), СН (углеводороды), NO<sub>x</sub>

(оксиды азота) и РТ (твердые частицы) проводилась в два этапа, т. е. серией поправок 01 и 02 [1]. В табл. 1 для дизелей диапазона мощности 130–560 кВт представлена динамика изменения технических нормативов выбросов ВВ в соответствии с требованиями Правил 96.

Таблица 1

**Предельные величины выбросов ВВ дизелей в соответствии с требованиями Правил 96**

Этапы Правил	Годы действия	СО	СН	NO <sub>x</sub>	РТ
		г/(кВт · ч)			
96-00	1995–2001	5,5	1,3	9,2	0,54
96-01	2001–2008	3,5	1,0	6,0	0,2
96-02	с 2008	3,5	Σ(НС + NO <sub>x</sub> ) = 4,0		0,2

Анализ изменения технических нормативов выбросов ВВ показывает, что предельные значения удельных выбросов NO<sub>x</sub> и РТ с 2008 г. установлены на уровне в 2,5–3 раза ниже значений нормативов 96-00. В связи с этим в процессе исследований отработке конструктивных мероприятий, обеспечивающих выполнение нормативов по NO<sub>x</sub> и РТ, должно уделяться особое внимание. Ранее накопленный опыт при нормализации экологических показателей дизелей КамАЗ до уровней Евро-2, 3, 4, предназначенных к установке на грузовые автомобили КамАЗ, показал, что наиболее трудновыполнимыми являются именно нормативы по NO<sub>x</sub> и РТ из-за характера их обратной взаимосвязи [2]. Необходимо отметить, что обеспечение нормативных требований по вредным выбросам автомобильных дизелей может достигаться как за счет рационального изменения элементов их конструкции, воздействия на процессы топливоподачи и газообмена [3], так и за счет применения систем последующей очистки отработавших газов (ОГ). В частности, анализ зарубежного опыта показывает, что снижение выбросов NO<sub>x</sub> применением на внедорожной технике технологии селективного каталитического восстановления (SCR) является дорогостоящим техническим решением, требующим внедрения дополнительных мероприятий по обеспечению надежности элементов системы SCR в тяжелых условиях эксплуатации [4].

В связи с этим основная цель настоящего исследования была сформулирована как поиск путей обеспечения выполнения технических нормативов выбросов ВВ дизелей КамАЗ в соответствии с требованиями Правил 96-02 за счет рационального выбора комплектации системы топливоподачи и оптимизации рабочего процесса двигателя без применения системы нейтрализации ОГ.

**1. Экологические показатели двигателя КамАЗ в базовой комплектации с ТНВД механического типа**

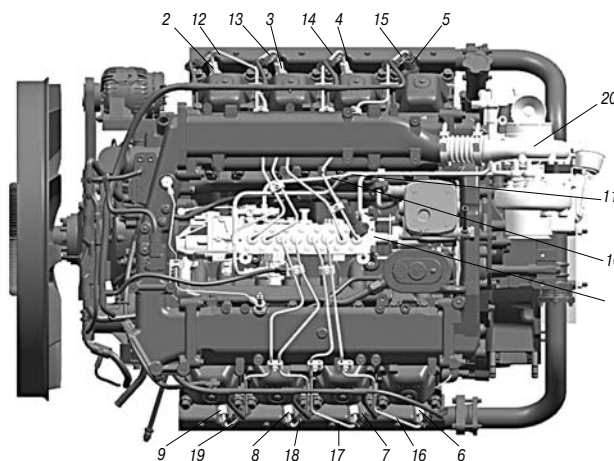
Исследования проведены на двигателе КамАЗ V8 размерностью  $D/S = 12/13$ , мод. 740.63-400 (Евро-3) в исходной комплектации с топливным насосом высокого давления (ТНВД) типа P7100 фирмы «Bosch» (Германия) с электронным регулятором управления нагрузочно-скоростными режимами работы типа RE-30, форсунками мод. 216А с шестью сопловыми отверстиями распылителя производства ООО УК АЗПИ (Россия). В исходной комплектации система турбонаддува состоит из одного турбокомпрессора (ТКР) типа S300G фирмы BWTS (Германия) с охладителем наддувочного воздуха (ОНВ) типа «воздух-воздух». В соответствии с техническими условиями максимальная полезная мощность двигателя — 400 л. с. при частоте вращения 1900 об/мин. Согласно действующей конструкторской документации номинальное значение степени сжатия у дизелей КамАЗ уровня Евро-3 составляет 16,8. На рис. 1 приведена компоновка системы топливоподачи с ТНВД типа P7100 на дизелях КамАЗ уровня Евро-3.

Сравнительные испытания исходной и опытных вариантов комплектаций двигателя проводились на аттестованном моторном стенде с индукторным тормозом модели ЕД-68 и расходомером топлива мод. РТ-2А фирмы «Мотортест» (Болгария). Измерение концентраций газообразных вредных выбросов (СО, НС, NO<sub>x</sub>) проводилось газоанализатором мод. МЕХА-7100D фирмы «Hogiba» (Япония), измерение выбросов РТ проводилось микротоннелем модели SPC-472 фирмы AVL (Австрия). Внешние условия испытаний двигателя, точность измерительных приборов, погрешности газоанализаторов и системы определения выбросов твердых частиц, с учетом точности взвешивания фильтров, в про-

Таблица 2

**Результаты испытаний двигателя мод. 740.63-400 на соответствие требованиям Евро-3**

Вариант	NO <sub>x</sub>	СН	СО	РТ
	г/(кВт · ч)			
УОВТ = 50 (исходный)	4,97	0,28	0,72	0,098
Нормы Евро-3	5,00	0,66	2,10	0,10



**Рис. 1. Двигатель КамАЗ мод. 740.63-400 (Евро-3). Установка системы топливоподачи с ТНВД типа P7100:**  
 1 — вал привода ТНВД типа P7100 с электронным регулятором RE-30; 2-9 — форсунки; 10, 11 — топливопроводы низкого давления; 12-19 — топливопроводы высокого давления; 20 — турбокомпрессор типа S300G

веденных исследованиях соответствовали требованиям Правил 96. Расчет удельных выбросов СО, НС, NO<sub>x</sub> и РТ выполнялся по методике, разработанной в НТЦ ОАО КамАЗ на основе требований Правил 96 [5].

В табл. 2 приведены результаты испытаний двигателя мод. 740.63-400 в комплектации традиционной ТА, ТКР мод. S300G (корпус турбины с отношением  $A/R = 0,8$ ) и перепуском ОГ мимо турбины. Удельные выбросы ВВ определены в соответствии с требованиями Правил ЕЭК ООН № 49-04А (Евро-3) по 13-ступенчатому стационарному европейскому циклу (ESC). Полученные результаты подтвердили соответствие двигателя в исходной комплектации требованиям Евро-3.

В табл. 3 представлены результаты сравнительных испытаний двигателя в комплектации с турбокомпрессором (отношение  $A/R = 0,8$ ), перепуском ОГ и вариантом турбины без перепуска

Таблица 3

**Влияние УОВТ и отношения A/R турбокомпрессора на выбросы ВВ двигателя мод. 740.63-400 в комплектации с ТНВД P7100 «Bosch»**

Вариант		NO <sub>x</sub>	СН	СО	РТ
		NO <sub>x</sub> + СН			
		г/(кВт · ч)			
A/R = 0,8	УОВТ=5°	4,48	0,25	1,10	0,208
		4,73			
	4°	4,22	0,39	1,19	0,241
		4,61			
	3°	4,12	0,20	1,42	0,270
		4,32			
A/R = 1,15	5°	4,44	0,24	1,07	0,145
		4,68			
	3°	3,81	0,27	1,79	0,203
		4,08			
Предельные величины Правил 96-02		4,00		3,50	0,20

ОГ с отношением  $A/R = 1,15$ . Экологические показатели двигателя определялись при различных значениях угла опережения подачи топлива (УОВТ). Анализ выполненных исследований показал, что комплектация двигателя мод. 740.63-400 традиционной топливной аппаратурой механического типа не позволяет достичь качества рабочего процесса в части смесеобразования и тепловыделения, необходимого для выполнения жестких требований Правил 96-02 по техническому нормативу выбросов ( $CH + NO_x$ ).

## 2. Экологические показатели двигателя КамАЗ, укомплектованного топливной аппаратурой (ТА) типа common rail (CR)

На первом этапе исследования проведены испытания двигателя мод. 740.63-400 в комплектации топливной аппаратурой (ТА) типа common rail фирмы «Bosch» в составе: электронный блок управления EDC 7U31, охлаждаемый топливом, ТНВД мод. CP 3.4, инжекторы мод. CRIN 2. Система турбонаддува двигателя комплектовалась одним ТКР мод. S300G с отношением  $A/R=0,8$  и перепуском ОГ, ОНВ типа «воздух-воздух». На рис. 2 представлен модуль аккумуляторной системы топливоподачи типа common rail, а на рис. 3 приведена его установка на дизелях КамАЗ уровня Евро-3. Конструкция и основные принципы адаптации аккумуляторной системы впрыска топлива common rail в составе двигателей грузовых автомобилей достаточно подробно изложены в издании, созданном специалистами фирмы «Bosch» [8]. В табл. 4 приведены результаты испытаний двигателя с ТА common rail и настрой-

Таблица 4

Результаты испытаний двигателя мод. 740.63-400 в исходной комплектации (ТА типа common rail) по циклу ESC (Евро-3)

Вариант	NO <sub>x</sub>	CH	CO	PT
	г/(кВт · ч)			
Исходный	4,97	0,23	0,76	0,068
Нормы Евро-3	5,00	0,66	2,10	0,10

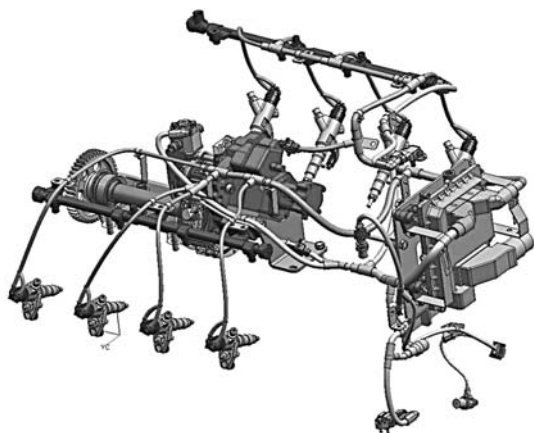


Рис. 2. Модуль аккумуляторной системы топливоподачи типа common rail

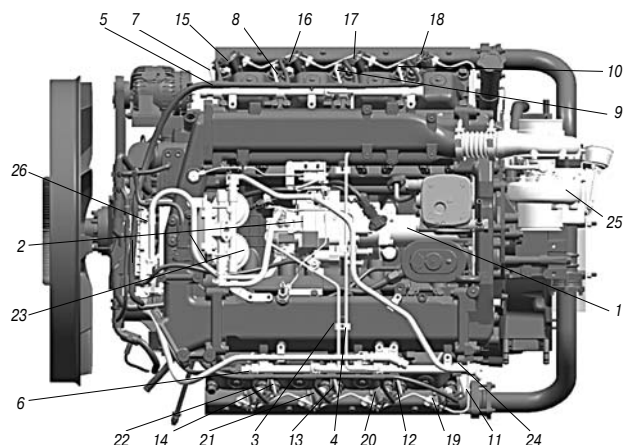


Рис. 3. Двигатель КамАЗ мод. 740.64-420 (Евро-3). Установка системы топливоподачи с ТА типа CR:

1 — редуктор привода насоса высокого давления; 2 — насос высокого давления топлива; 3, 4 — топливопроводы подвода топлива к рэйлам; 5 — рэйл правый; 6 — рэйл левый; 7-14 — топливопроводы подвода топлива к инжекторам; 15-22 — инжекторы; 23 — фильтр тонкой очистки топлива; 24 — топливопроводы низкого давления топлива; 25 — турбокомпрессор типа S300G с клапаном перепуска ОГ; 26 — электронный блок управления

ками таблиц аппликационных параметров (ТАП), обеспечивающих соответствие Евро-3. по экологическим показателям.

Однако исходный вариант настроек ТАП, как показали результаты испытаний, приведенные в табл. 5, не обеспечивает выполнение технических нормативов Правил 96-02 по сумме ( $NO_x + CH$ ), поскольку в Правилах 96 испытания проводятся по более нагруженному 8-ступенчатому циклу. В связи с этим по сериям регулировочных характеристик была проведена корректировка настроек ТАП двигателя на режимах максимального крутящего момента ( $M_{Kmax}$ ) и номинальной мощности ( $N_{Eном}$ ) в сторону уменьшения давлений впрыскивания топлива и УОВТ.

Откорректированный (опытный) вариант настроек ТАП двигателя мод. 740.63-400 в комплектации с ТА типа common rail обеспечил выполнение требований Правил 96-02, но при этом значительно ухудшилась топливная экономичность двигателя. Удельный эффективный расход топлива на режиме  $M_{Kmax}$  вырос на 9 г/(л. с. · ч), а на режиме  $N_{Eном}$  на 30 г/(л.с. · ч), что неприемлемо для современных автомобильных дизелей,

Таблица 5

Результаты испытаний двигателя мод. 740.63-400 в исходном и опытном вариантах ТАП по 8-ступенчатому циклу Правил 96

Вариант ТАП	NO <sub>x</sub>	CH	CO	PT
	г/(кВт · ч)			
Исходный (Евро-3)	9,41	0,3	0,6	0,072
Опытный	3,78	0,14	1,09	0,158
Предельное значение Правил 96-02	4,0 (NO <sub>x</sub> + CH)		3,5	0,2

а также не соответствует требованиям технического задания на семейство двигателей КамАЗ экологического класса 4 для внедорожной техники. С учетом полученного результата в части топливной экономичности, было принято решение продолжить исследования по обеспечению выполнения требований Правил 96-02 на образце двигателя с увеличенной степенью сжатия. Ранее проведенные сравнительные испытания двигателя КамАЗ мод. 740.75-440 (Евро-4) со степенями сжатия 16,8; 17,9; 19 выявили существенное снижение удельного расхода топлива и удельных выбросов РТ с увеличением степени сжатия. Вышеуказанный положительный эффект был достигнут за счет оптимального сочетания элементов формы камеры сгорания в поршне, ориентации сопловых отверстий распылителя, скорости вихревого движения воздушного заряда, оптимально подобранных параметров впрыскивания топлива, гибкое управление которыми является одной из основных функций ТА типа common rail [6, 7]. В табл. 6 представлены результаты измерений удельных выбросов ВВ, полученные на двигателе мод. 740.64-420 при степени сжатия  $\epsilon = 17,9$  с регулировкой максимальной полезной мощности 420 л. с.

Из представленных в табл. 6 данных следует, что двигатель, испытанный с исходным вариантом настроек ТАП, не укладывается в требования Правил 96-02 по сумме ( $\text{CH} + \text{NO}_x$ ). В связи с этим настройки ТАП были подвергнуты дополнительной оптимизации на основе серии регулировочных характеристик на режимах  $M_{\text{Кmax}}$  и  $M_{E \text{ ном}}$ , с выбором давлений впрыскивания и УОВТ, обеспечивающих достижение целевого значения ( $\text{CH} + \text{NO}_x$ )  $< 4,0$  г/(кВт · ч) — при наименьших значениях удельного расхода топлива. В результате выполненной оптимизации удельные выбросы двигателя с опытным вариантом настроек ТАП приведены в соответствии с требованиями Правил 96-02. Следует отметить, что полученные технические нормативы ВВ достигнуты при значениях удельного эффективного расхода топлива, характерного для семейства серийно выпускаемых дизелей КамАЗ экологического класса

Таблица 6

Результаты испытаний двигателя мод. 740.64-420 ( $\epsilon = 17,9$ ) в исходном и опытном вариантах ТАП по 8-ступенчатому циклу Правил 96

Вариант ТАП	NO <sub>x</sub>	CH	CO	РТ
	г/(кВт · ч)			
Исходный (Евро-4)	5,16	0,013	0,82	0,172
Опытный	3,8	0,18	0,98	0,171
Предельной значение Правил 96-02	4,0 (NO <sub>x</sub> + CH)		3,5	0,2

Евро-3. Значение минимального удельного расхода топлива двигателя мод. 740.64-420, удовлетворяющего предписаниям Правил 96-02, в диапазоне частот вращения  $n = 1500-1600$  об/мин составило 152 г/(л. с. · ч). Особо следует отметить, что проведенные исследования обоснованно подтвердили возможность достижения на двигателях КамАЗ с ТА типа common rail требований Правил 96-02 без применения системы очистки газов от NO<sub>x</sub> по технологии SCR.

### 3. Результаты сертификационных испытаний семейства двигателей КамАЗ на соответствие требованиям Правил 96-02

Результаты выполненных исследований были положены в основу разработки конструкторской документации и технического описания на семейство новых двигателей КамАЗ, соответствующих требованиям Правил 96-02. Сертификационные испытания базового двигателя КамАЗ мод. 740.642-420 (рис. 4) проводились в два этапа: ускоренные стендовые испытания двигателя на моторном стенде завода с определением добавочных коэффициентов ВВ за период устойчивости характеристик выбросов и стендовые испытания двигателя в ИЦ-НИЦИАМТ (Автополигон НАМИ) с определением фактических значений выбросов ВВ. Результаты проведенных сертификационных испытаний представлены в табл. 7.

Результаты сертификационных испытаний послужили основанием для выдачи ОАО КамАЗ сообщения, касающегося официального утверждения нового семейства двигателей, соответствующего предписаниям Правил ЕЭК ООН № 96-02 в отношении выбросов ВВ с ОГ. Технические характеристики дизелей КамАЗ, прошедших сертификацию, представлены в табл. 8.

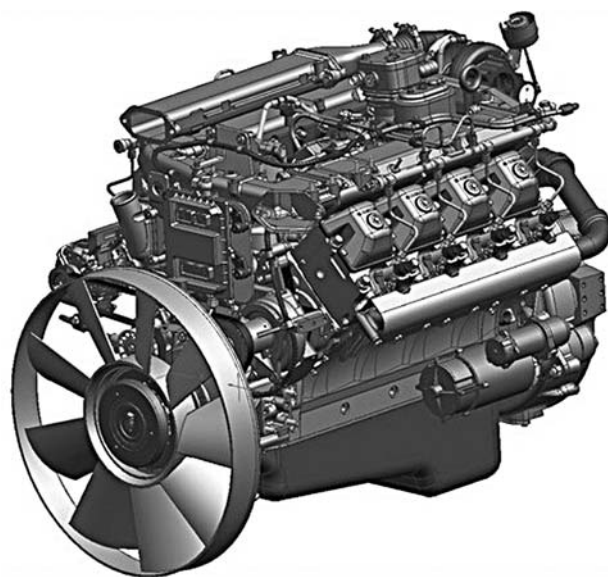


Рис. 4. Двигатель КамАЗ мод. 740.642-420 CR

Таблица 7

**Удельные выбросы вредных веществ, г/(кВт · ч)  
по результатам сертификационных испытаний**

Вредные выбросы	СО	NO <sub>x</sub> + СН	РТ
Определенные при испытаниях значения	0,77	3,55	0,170
Добавочный коэффициент ухудшения	0,53	0,00	0,016
Определенные значения, включая добавочный коэффициент ухудшения	1,30	3,55	0,186
Предельные значения Правил ЕЭК ООН № 96-02	3,5	4,0	0,20

Таблица 8

**Технические характеристики дизелей КамАЗ  
удовлетворяющих предписаниям  
Правил ЕЭК ООН № 96-02**

Модель двигателя	Параметры					
	Тип	D×S, мм	iVh, л	n <sub>N</sub> , об/мин	N <sub>e</sub> , кВт	M <sub>кр max</sub> , Н·м
740.642-420	V-8	120×130	11,76	1900	309	1864
740.632-400					294	1766
740.602-360					265	1570
740.612-320					235	1373
740.662-300					221	1275
740.622-280					206	1177
740.652-260					191	1128

**Выводы**

1. Результаты проведенной научно-исследовательской работы позволили создать семейство коммерческих, конкурентоспособных дизелей КамАЗ, удовлетворяющих предписаниям Правил ЕЭК ООН № 96-02 и Технического регламента «О требованиях к выбросам автомобильной техникой, выпускаемой в обращение на территории Российской Федерации, вредных (загрязняющих) веществ».

2. Созданное семейство дизелей КамАЗ экологического класса 4, предназначенное для применения на внедорожной технике, усиливает ключевые компетенции и потенциал ОАО КамАЗ в развитии конструкции и расширении области применения двигателей собственного производства.

**Литература**

1. Правила № 96. Поправки серии 02. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения двигателей с воспламенением от сжатия для установки на сельскохозяйственных и лесных тракторах и внедорожной подвижной технике в отношении выброса загрязняющих веществ этими двигателями. Е/ЕСЕ/324, Е/ЕСЕ/TRANS/505, 8 April 2008.
2. Что делать? (чтобы обеспечить ЕВРО-2)/ И.Ю. Хамидуллин, Д. Х. Валеев, Н. А. Гатауллин и др. // Двигатель. — 1999. — № 6 (6). — С. 15–17.
3. Топливные системы и экономичность дизелей/ И. В. Астахов, Л. Н. Голубков и др. — М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
4. Мельник Г.В. Технологии для обеспечения малотоксичной работы транспортных дизелей и альтернативные топлива. Проблемы применения технологии SCR на внедорожной технике // Двигателестроение. — 2011. — № 3. — С. 46–48.
5. Гатауллин Н. А., Борисенков Е. Р., Драчёва И. П., Хафизов Р. Х. Комплекс программ для обработки результатов испытаний двигателей на стенде // СМ 37.104.17.3550-2001 — Информационная справка. — Наб. Челны: ОАО КамАЗ, 2001. — 42 с.
6. Иващенко Н. А., Вагнер В. А., Грехов Л. В. Дизельные топливные системы с электронным управлением: учебно-практическое пособие. — Барнаул: Изд-во АлтГТУ им. И. И. Ползунова, 2000. — 111 с.
7. Isenburg R., Milnzenmay M. Diesel — Speichereinspritzsystem Common Rail // Robert Bosch GmbH. 1998. — P. 49.
8. Системы управления дизельными двигателями/ пер. с немец. С40. — М.: ЗАО КЖИ «За рулем», 2004. — 480 с.

**ПРЕДЛАГАЕМ РАЗМЕЩЕНИЕ РЕКЛАМЫ  
Ориентировочные тарифы на 1 полугодие 2012 г.**

Первая страница обложки	Полноцветная	40 000 руб.
Вторая и третья страницы обложки	Полноцветная	36 000 руб.
Четвертая страница обложки	Полноцветная	38 000 руб.
Внутри журнала из расчета одна страница формата А4	Полноцветная	36 000 руб.
	Черно-белая	30 000 руб.