

УДК 502.3:621.311.23

## ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИНИ-ТЭЦ, РАБОТАЮЩИХ НА ПРИРОДНОМ И БИОГАЗЕ

<sup>1</sup>Маслеева О.В., <sup>1</sup>Пачурин Г.В., <sup>2</sup>Головкин Н.Н.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеяева,  
Нижегород, e-mail: PachurinGV@mail.ru

<sup>2</sup>ФГБОУ ВПО Нижегородский государственный лингвистический университет  
им. Н.А. Добролюбова, Нижний Новгород

Широкое использование органических топлив является одной из главных причин сильного антропогенного загрязнения атмосферы и изменения климата. Это непосредственным образом связано с последствиями сжигания органического топлива, образованием оксидов углерода, серы, азота, соединений свинца, сажи, углеводородов, в том числе канцерогенных и других веществ в твердом, жидком и газообразном состоянии. Около 60% парниковых выбросов антропогенного происхождения приходится на энергетический сектор. В России эта доля достигает 85%. На основе исследования загрязнения атмосферного воздуха при эксплуатации мини-ТЭЦ с газопоршневыми двигателями мощностью 100 кВт с целью выработки электро- и теплотенергии для жилых домов и фермы с использованием традиционного энергоресурса (природного газа), а также возобновляемого источника энергии (биотоплива) в работе проведен экологический и экономический анализ эксплуатации мини-ТЭЦ мощностью 100кВт с газопоршневыми двигателями, сжигающими биогаз и природный газ. Рассчитан уровень, загрязнения атмосферного воздуха, срок окупаемости проекта. Так за период 10 лет вариант на природном газе выигрывает, а горизонте расчета в 13 и более лет выгоднее становится вариант на биогазе.

**Ключевые слова:** мини-ТЭЦ, биогаз, природный газ, вредные вещества, энергопотребление, энергосбережение, природные ресурсы, атмосферный воздух.

## ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF MINI- CHP AND BIOGAS NATURAL

<sup>1</sup>Masleeva O.V., <sup>2</sup>Golovkin N.N., <sup>1</sup>Pachurin G.V.

<sup>1</sup>FGBOU VPO Novgorod State Technical University R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod,  
e-mail: PachurinGV@mail.ru; <http://www.famous-scientists.ru/1238>

<sup>2</sup>FGBOU VPO Nizhny Novgorod State Linguistic University. N.A. Dobrolyubova Univ. «RTD»,  
Nizhny Novgorod

The widespread use of fossil fuels is a major cause of high anthropogenic air pollution and climate change. It is directly linked to the effects of burning fossil fuels, the formation of oxides of carbon, sulfur, nitrogen, lead compounds, soot, hydrocarbons, including carcinogens and other substances in solid, liquid and gaseous state. About 60 % of the greenhouse emissions of anthropogenic origin in the energy sector. In Russia, this share is 85 %. Based on a study of air pollution in the operation CHP with gas engines of 100 kW to generate electricity and heat for homes and farms with the use of traditional energy resources (natural gas) and renewable energy (biofuels) in the paper the ecological and economic analysis of the operation of CHP capacity of 100kW with a gas piston engines that burn biogas and natural gas. Calculated level of air pollution, the payback period of the project. So for a period of 10 years for natural gas version of wins and the horizon in the calculation of 13 years or more profitable to become an option on biogas.

**Keywords:** CHP, biogas, natural gas, hazardous substances, energy consumption, energy efficiency, natural resources, air.

### Введение

При существующем уровне научно-технического прогресса энергопотребление может быть покрыто [1,8] лишь за счет использования органических топлив (уголь, нефть, газ), гидроэнергетики и атомной энергетики. Однако по результатам многочисленных исследований органическое топливо в ближайшее десятилетие сможет удовлетворить лишь часть запросов мировой энергетики, так как запасы ископаемых ресурсов – невозобновляемы, ограничены и в скором будущем будут исчерпаны [3].

Широкое использование органических топлив является одной из главных причин наступающего экологического кризиса, который проявляется, прежде всего, сильным антропогенным загрязнением атмосферы и изменением климата. Изменение климата непосредственным образом связано с последствиями сжигания органического топлива и как следствие, образованием оксидов углерода, серы, азота, соединений свинца, сажи, углеводородов, в том числе канцерогенных и других веществ в твердом, жидком и газообразном состоянии [9].

Около 60% парниковых выбросов антропогенного происхождения приходится на энергетический сектор. В России эта доля достигает 85%. Снижение выбросов возможно путем реализации низкоуглеродных сценариев развития экономики страны, прописанных Энергетической стратегией - 2030.

Их основой является отказ от традиционных путей развития энергетики, реализация мероприятий по энергосбережению, повышению энергоэффективности и развитию возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

### Методика исследования

В работе проведены исследования загрязнения атмосферного воздуха при эксплуатации мини-ТЭЦ с газопоршневыми двигателями мощностью 100 кВт с использованием традиционного энергоресурса (природного газа), а также возобновляемого источника энергии (биотоплива). Мини-ТЭЦ вырабатывает электро и теплоэнергию для жилых домов и фермы [2]. В качестве источника биотоплива используют навоз.

Для мини-ТЭЦ с газопоршневыми двигателями мощностью 100 кВт при использовании биотоплива необходим животноводческий комплекс на 700 коров, в котором образуется за год 8,9 тыс. т навоза. Для расчета суточное выделение экскрементов от одного животного выбрано в соответствии с ОНТП 17-81 «Об-

щесоюзные нормы технологического проектирования систем удаления, обработки, обеззараживания, хранения, подготовки и использования навоза и помета».

В качестве источника энергии рассматривались газопоршневые установки (ГПУ) фирмы Caterpillar [6], специально предназначенные для сжигания биогаза и природного газа. Технические характеристики газопоршневых установок Caterpillar приведены в табл. 1. В паспортных данных завод изготовитель указывает уровни токсичности выхлопных газов (оксидов азота, оксида углерода и углеводороды) при работе на номинальном режиме.

Расчет максимальных значений приземных концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе выполнен в соответствии с: ОНД-86 «Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий», «Руководство по контролю источников загрязнения атмосферы», «Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух», «Методика расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных дизельных установок».

При сжигании органического топлива в энергетике в атмосферу будут выбрасываться: оксиды азота, оксид углерода, углеводороды. Согласно гигиеническим требованиям установлены предельно-допустимые концентрации (ПДК, мг/м<sup>3</sup>) вредных веществ, загрязняющих атмосферный воздух.

Таблица 1

Технические характеристики ГПУ Caterpillar

Топливо	природный газ	биогаз
Электрическая мощность установки (кВт),	125	103
Рабочий объем (л)	69	69
Номинальная частота вращения (об/мин)	1500	1500
Температура выхлопных газов, °С	448	479
Расход топлива: биогаза (нм <sup>3</sup> /ч)	286	526
Объем воздуха на образование смеси, нм <sup>3</sup> /мин	78,6	67,9
Температура выхлопных газов	485	479
Объем выхлопных газов, нм <sup>3</sup> /мин	84,2	78,8
Газовоздушная смесь/объем топлива	17,7	9,0
Уровни токсичности выхлопных газов		
NOx при содержании O <sub>2</sub> 5% (мг/нм <sup>3</sup> )	250	500
CO при содержании O <sub>2</sub> 5% (мг/нм <sup>3</sup> )	1180	1119
HC (всего) при содержании O <sub>2</sub> 5% (мг/нм <sup>3</sup> )	3014	1375
Содержание O <sub>2</sub> (сухой) в выхлопных газах (%)	8,1	6,5
Габариты и масса		
Длина (мм)	4918	4906
Ширина (мм)	2204,8	2155,4
Высота (мм)	2011,7	2051,2
Отгрузочная масса (кг)	11 813	11 814

Предельно допустимые концентрации приняты согласно ГН 2.1.6.1338-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест». Перечень загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу, и санитарно-гигиенические характеристики загрязняющих веществ, представлены в табл. 2. При проведении расчетов загрязнения атмосферы для углеводородов используется ОБУВ по керосину (код 2732).

го вещества, которая сравнивалась с ПДК. Расчет был выполнен в программном комплексе «ПРИЗМА» НПП «ЛОГУС». Поле максимальных концентраций было рассчитано для прямоугольника: длина 1000 м, ширина 1000 м, шаг по длине 100 м, шаг по ширине 100 м. Координаты центра: X = 500 м, Y = 500 м. Высота: 0,0 м. Результаты расчета максимальных приземных концентра-

Таблица 2

Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест

№ код	Наименование вещества	Формула	Величина ПДК (мг/м <sup>3</sup> )		Класс опасности
			максимально разовая	средне-суточная	
4	Азота диоксид	NO <sub>2</sub>	0,2	0,04	2
6	Азот (II) оксид	NO	0,4	0,06	3
521	Углерод оксид	CO	5	3	4
2732	Углеводороды	CH	1,2		

Исследование влияния источников энергии на окружающую среду проводили для двух видов топлива - биогаз и природный газ для газопоршневых установок мощностью 1000 кВт для дымовых труб высотой 150 м и диаметра трубы 0,4 м для вредных веществ CO, NO<sub>2</sub>, NO, углеводородов. В соответствии с техническими характеристиками газопоршневых установок Caterpillar были рассчитаны валовые выбросы выбрасываемых вредных веществ.

#### Результаты экологического анализа

Результаты расчета валовых выбросов (г/с) загрязняющих веществ приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета валовых выбросов загрязняющих веществ газопоршневых установок Caterpillar

Топливо	Вредные вещества			
	CO	NO <sub>2</sub>	NO	CH
	Валовые выбросы, г/с			
биогаз	0,551	0,197	0,032	0,677
газ	0,621	0,105	0,017	1,586
	Валовые выбросы, т/год			
биогаз	17,38	6,21	1,01	21,36
газ	19,58	3,32	0,54	50,02

Оценка влияния газопоршневых установок осуществлялась по величине максимальной приземной концентрации вредно-

стей вредных веществ (CO, NO<sub>2</sub>, NO, углеводородов) газопоршневых установок Caterpillar на биотопливе и природном газе представлены на рис. 1.

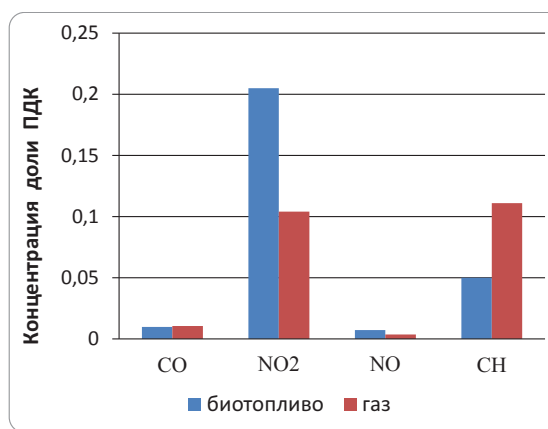


Рис. 1. Приземные концентрации вредных веществ при высоте дымовой трубы 15 м

Проведенные исследования влияния параметров газопоршневых установок, на уровень загрязнения атмосферного воздуха показали, что:

- при сжигании биотоплива и природного газа образуются CO, NO<sub>2</sub>, NO, углеводороды,
- основным вредным веществом является NO<sub>2</sub>;
- уровень загрязнения оксидами азота при использовании биотоплива примерно в 2 раза выше, чем при сжигании природного газа;

- уровень загрязнения CO примерно одинаковый для обоих видов топлива;
- уровень загрязнения углеводородами при использовании природного газа примерно в 2 раза выше, чем при сжигании биотоплива;
- при диаметре дымовой трубы 0,4 м и высоте дымовой трубы 15 м максимальные приземные концентрации всех вредных веществ не превышают ПДК.

**Результаты экономического анализа**

Рассмотрим теперь с экономической точки зрения выгодность применения того или иного вида топлива для газо-поршневой мини-ТЭЦ на базе Caterpillar. Сравнение двух вариантов производится с вариантом питания природным газом от центральной сети по соответствующим тарифам. В варианте с биогазом в расчетах принималась биогазовая установка БИОЭН-1 ООО «ГРИНТЕК», г.Москва, г.Н.Новгород, емкостью 400 м<sup>3</sup> [4]. Производительность данной установки несколько превышает потребность в биогазе для мини-ТЭЦ, поэтому излишки газа условно приняты для продажи по себестоимости. Стоимость ГПУ принята на основании [5]. В табл. 4 приведены исходные данные для расчета технико-экономических показателей сравниваемых вариантов.

При расчете расходной части по вариантам учтены штрафы за загрязнение атмосферного воздуха и почвы жидкими фракциями экскрементов. При расчете доходной части учитывалось, что будет продажа удобрений; ликвидация штрафов за загрязне-

ние почвы жидкими фракциями экскрементов за счет их утилизации.

Расчет удельных затрат на топливо ГПУ приведен в табл. 5.

Анализ проводился двумя методами: статическим и динамическим. Статический метод предполагает, что параметры проектов из года в год не меняются и поэтому в качестве критериев выбраны: годовые приведенные затраты, годовой экономической эффект и эффективность капитальных вложений.

Результаты расчетов статическим методом приведены в табл. 6.

Как следует из анализа результатов, представленных в табл. 6 эффективность варианта ГПУ на биогазе почти в два раза выше.

Что касается годовых приведенных затрат, то они зависят от коэффициента приведения капитальных вложений. В условиях плановой централизованной экономики этот коэффициент был нормативным и для энергетики принимался равным 0,12 1/год. В условиях рыночной экономики нормативного коэффициента не существует, а есть понятие «альтернативная стоимость», на основании которой рассчитывается реальный коэффициент приведения (реальная процентная ставка *r*) по формуле:

$$r = (E_n - b) / (1 + b), \quad (1)$$

где *E<sub>n</sub>* – номинальная процентная ставка (альтернативная стоимость), *b* – средний уровень инфляции.

В табл. 7 и на рис. 2 приведены зависимости годовых приведенных затрат по вариантам от коэффициента приведения.

**Таблица 4**

Исходные данные по вариантам

	Природный газ	Биогаз
Caterpillar G3406 (модель)	DM5447	DM8660
Электрическая мощность, кВт	125	103
Стоимость ГПУ, тыс. руб	5625	4635
Удельные затраты на топливо, руб/кВт.ч	1,34	0,69
Стоимость биогазовой установки, тыс.руб	-	14520
Себестоимость выработки биогаза, руб/м <sup>3</sup>	-	1,9

**Таблица 5**

Расчет удельных затрат на топливо ГПУ

	Мощность установки, кВт	Расход, м <sup>3</sup> /ч на 1 час	Кол-во часов для выработки 1000 кВт.ч, час	Расход, м <sup>3</sup> /ч на 1000 кВт.ч	Удельная стоимость газа, руб/м <sup>3</sup>	Удельные затраты на топливо, руб/кВт.ч
ГПУ на биогазе	103	37,6	9,7	365	1,9	0,69
ГПУ на природном газе	125	39,0	8,0	312	4,3	1,34

Таблица 6

## Сравнительный анализ вариантов

Параметры	Природный газ САТ	Биогаз САТ+(БИОЭН-1-400)
Эл. мощность установки, кВт	125	103
Стоимость установки, тыс.руб	5625	19155
Удельные затраты на топливо, руб/кВт.ч	1,34	0,69
Себестоимость выработки биогаза, руб/м <sup>3</sup>		1,9
Годовая выработка электроэнергии, кВт.ч/год	1095000	902280
Годовые затраты на топливо, тыс. руб/год	1467,30	622,57
Штрафы за загрязнение воздуха, тыс. руб/год	896,88	1858,02
Штрафы за загрязнение почвы, тыс.руб/год	2210,76	
ИТОГО годовые экспл. затраты, тыс.руб/год	4574,94	2480,59
Коэффициент приведения, 1/год	0,12	0,12
Годовые приведенные затраты, тыс.руб/год	5249,94	4779,19
Доходы (условно) от:		
продажи эл.энергии, тыс.руб/год	4927,50	4060,26
продажи теплоэнергии, тыс.руб/год	1315,15	1083,69
продажи излишек биогаза, тыс.руб/год		483,79
утилизация жидкой фракции, тыс.руб/год		2210,76
продажи удобрения, тыс.руб/год		5340,00
ИТОГО доходов (условно), тыс.руб/год	6242,65	13178,49
Годовой эффект, тыс.руб/год	1667,72	10697,90
Эффективность, руб/руб	0,30	0,56

Таблица 7

## Зависимости годовых приведенных затрат от коэффициента приведения

	Коэффициент приведения, 1/ год					
	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16
Годовые приведенные затраты САТ, тыс.руб/год	4912	5025	5137	5250	5362	5475
Годовые приведенные затраты САТ+БИОН-1, тыс.руб/год	3630	4013	4396	4779	5162	5545

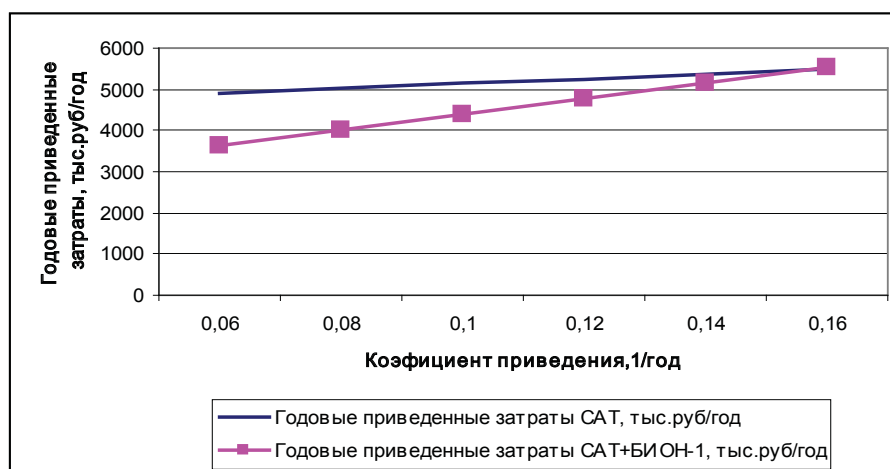


Рис. 2. Зависимости годовых приведенных затрат от коэффициента приведения

Как видно из табл. 7 и рис. 2 при коэффициенте приведения менее 0,16 1/год выгоднее вариант на биогазе, в противном случае – вариант на природном газе.

Динамический анализ – это анализ движения денежных потоков в реальном времени [7]. На рис. 3 представлены условные

прогнозные календарные планы-графики реализации проектов по вариантам.

Графики окупаемости проектов представлены на рис. 4.

Интегральные показатели достоинства проектов приведены в табл. 8

№	Наименование этапа	Длительность	2013			
			1 кв.	2 кв.	3 кв.	4 кв.
▶ 1	● Установка под ключ	180				5 737,72
2	⚙ Производство [Электроэнергия 1]	...			▼	
3	⚙ Производство [Теплоэнергия]	...			▼	

Рис. 3. а) Вариант на природном газе (САТ)

№	Наименование этапа	Длительность	2013			
			1 кв.	2 кв.	3 кв.	4 кв.
▶ 1	● Установка миниТЭЦ Caterpillar	180				4 727,88
2	● Установка биогазовой установки	180				14 810,96
3	⚙ Производство [Электроэнергия]	...			▼	
4	⚙ Производство [Теплоэнергия]	...			▼	
5	⚙ Производство [Утилизация жидкой фракции]	...			▼	
6	⚙ Производство [Биогаз]	...			▼	
7	⚙ Производство [Удобрение]	...			▼	

Рис. 3. б) - Вариант на биогазе (САТ+БИОН-1))

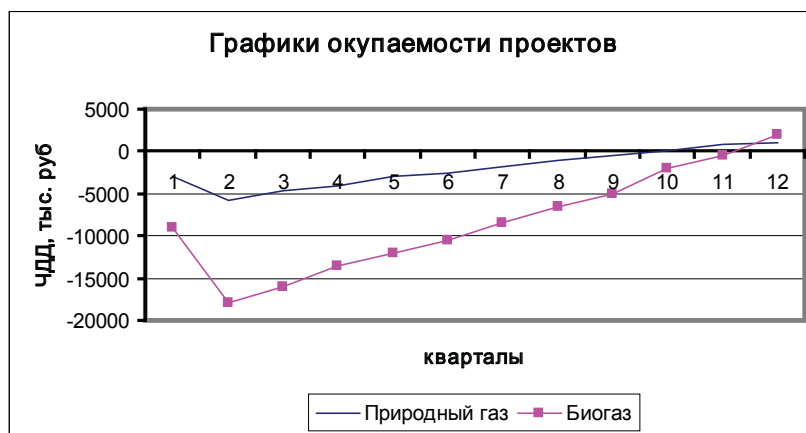


Рис. 4. Графики окупаемости проектов

Таблица 8

Интегральные показатели достоинства проектов за 10 лет

Показатель	Природный газ	биогаз
Ставка дисконтирования, %	14,00	14,00
Период окупаемости - РВ, мес.	25	29
Дисконтированный период окупаемости - DPВ, мес.	30	37
Чистый приведенный доход – NPV, тыс.руб	11 598	27015
Индекс прибыльности - PI	3,12	2,52
Внутренняя норма рентабельности - IRR, %	83,48	66,54

**Выводы**

1 - мини-ТЭЦ на биогазовых установках более дорогостоящие, чем работающие на природном газе;

2 - эффективность капитальных вложений при использовании мини-ТЭЦ на биогазовых установках почти вдвое выше, чем работающих на природном газе;

3 - в случае проектов продолжительностью до 12-13 лет выгоднее использовать природный газ;

4 - для долгосрочных проектов более 13 лет преимущество имеют биогазовые установки;

5 - биогазовые установки - выгодное средство для вкладывания денег на перспективу в сельском хозяйстве;

Таким образом, анализ интегральных динамических показателей проекта за период 10 лет показывает, что вариант на природном газе выигрывает. Однако при горизонте расчета в 13 и более лет выгоднее становится вариант на биогазе.

**Список литературы**

1. Маслеева О.В., Пачурин Г.В. Экологическая и экономическая целесообразность использования биотоплива // *Фундаментальные исследования*. – 2012. – №6 (1). – С. 139-144.
2. Маслеева О.В., Пачурин Г.В., Соснина Е.Н., Шалухо А.В. Анализ принципов работы биогазовых

установок // *Экология и промышленность России*. – 2012. – № 10. – С. 10-14.

3. Маслеева О.В., Пачурин Г.В., Соснина Е.Н., Шалухо А.В. Оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха при сжигании биогаза на когенерационных установках // *Экология и промышленность России*. – 2012. – № 12. – С. 48-50.

4. О когенерации, малой энергетике и строительстве тепловых электростанций. <http://www.cogeneration.ru/problems/accommodation-of-mini-tec/> (дата обращения: 03.11.2013).

5. Биогазовые установки для сельского хозяйства фирмы АО Центр «ЭКОРОС». <http://itk-energo.narod.ru/Predlogenie1.3.htm> (дата обращения: 03.11.2013).

6. Газовые электростанции Caterpillar – газопоршневые установки Катерпиллар. <http://www.manbw.ru/analytics/caterpillar.html> (дата обращения: 03.11.2013).

7. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиций. – М.: Экономика, 2000.

8. Соснина Е.Н., Маслеева О.В., Пачурин Г.В. Сравнительная оценка вариантов решения проблемы парниковых газов в энергетике // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – №3. URL: [www.science-education.ru/109-9493](http://www.science-education.ru/109-9493) (дата обращения: 27.06.2013).

9. Соснина Е.Н., Маслеева О.В., Пачурин Г.В., Филатов Д.А. Экологическое воздействие мини-ТЭЦ с газопоршневыми и дизельными двигателями на окружающую среду // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 6 (часть 1). – С. 72-75.