МИНОБРНАУКИ РОССИИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ЛЭТИ» ИМ. В.И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)
Кафедра информационной безопасности

ОТЧЕТ

по лабораторной работе №5
по дисциплине «Криптография и защита информации»
Тема: Изучение шифра AES

Студент гр. 9381 _____ Колованов Р.А.

Преподаватель _____ Племянников А.К.

Санкт-Петербург
2022

Цель работы.

Исследовать характеристики шифра AES и финалистов конкурса AES, а также изучить атаку предсказанием дополнения и получить практические навыки работы с шифрами и проведения атаки, в том числе с использованием приложения Cryptool 1 и 2.

Основные теоретические положения.

Преобразования шифра AES.

Шифр AES (Rijndael) работает на основе перестановочно-подстановочной сети (SP-сеть). Обобщенная схема работы алгоритма представлена на рисунке 5.1.

В версии с наименьшей длиной ключа алгоритм AES получает на вход блок открытого текста размером 16 байт и 16 байт ключа. Значения блока записывается в столбцы матрицы состояний размером 4x4 байт.

Процедура расширения ключей *ExpandKey* создает последовательно (слово за словом) 128-битные раундовые ключи от единственного входного ключа шифра.

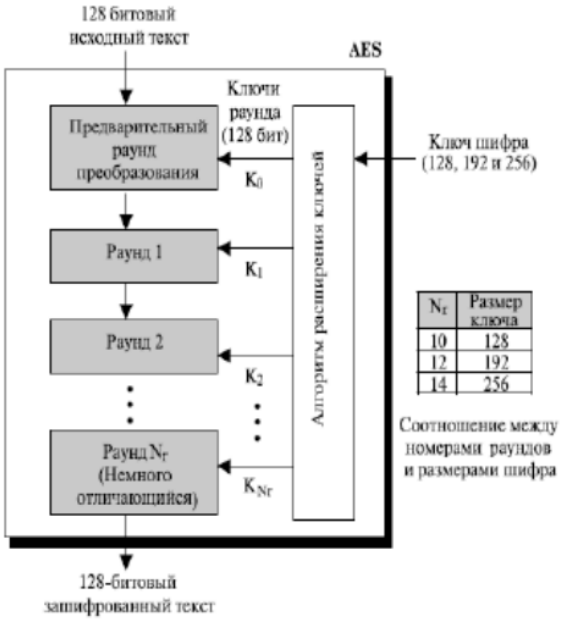


Рисунок 5.1

После того, как сформированы раундовые ключи, начинается раундовая обработка матрицы состояний. В каждом раунде алгоритма выполняются следующие преобразования, представленные на рисунке 5.2:

1. Столбцы матрицы состояний складываются с ключом шифра операцией XOR;

2. Полученная матрица состояний проходит через преобразование подстановки *SubBytes*;

3. Циклический сдвиг влево всех строк матрицы состояний выполняется преобразованием *ShiftRows*;

4. Смешивание столбцов матрицы состояний путем ее умножения (XOR 11B) на матрицу констант в конечном поле $GF(2^8)$ выполняет преобразование *MixColumn*, а сложение полученных столбцов матрицы состояний с раундовым ключом операцией XOR – преобразование *AddRoundKey*;

5. Действия 2-5 повторяются в каждом раунде за исключение последнего;

6. Последний раунд не включает в себя смешивание столбцов.

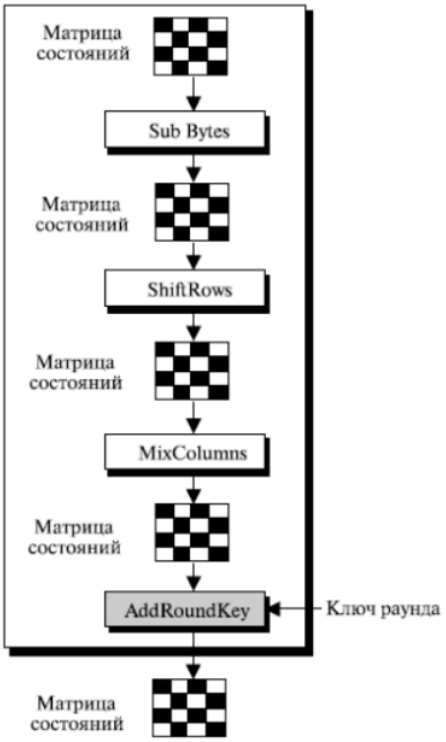


Рисунок 5.2

Расшифровывание выполняется применением обратных операций и раундовых ключей в обратной последовательности.

Финалисты конкурса AES.

Победителем конкурса AES является алгоритм Rijndael (ставший AES), так как по всем характеристикам этот алгоритм не уступает остальным алгоритмам-финалистам. Остальные финалисты конкурса (Serpent, Twofish, MARS и RC6), практически равнозначны по совокупности характеристик, за исключением алгоритма MARS, имеющего существенно больше недостатков, в том числе алгоритм практически нереализуем в условиях ограниченных ресурсов.

Атака предсказанием дополнения на шифр AES в режиме CBC.

При проведении этой атаки предполагается, что нарушитель может модифицировать и отправлять зашифрованное сообщение серверу для расшифровки, а также распознавать ответы сервера о корректности дополнения

последнего блока. Дешифровка сообщения нарушителем начинается с последнего блока шифротекста.

Рассмотрим расшифровку блока C_{i+1}:

1. Формируем R – все биты, кроме последнего, случайные значения. Перебираем байт R_n от 0x00 до 0xFF, каждый раз посылая на сервер $[R||C_{i+1}]$. Если при некотором R_n сервер «одобряет», то $T_n = 01$, $S_n = R_n \oplus 0x01$, $p_n = S_n \oplus C_n$. Схема первого этапа представлена на рисунке 5.3.

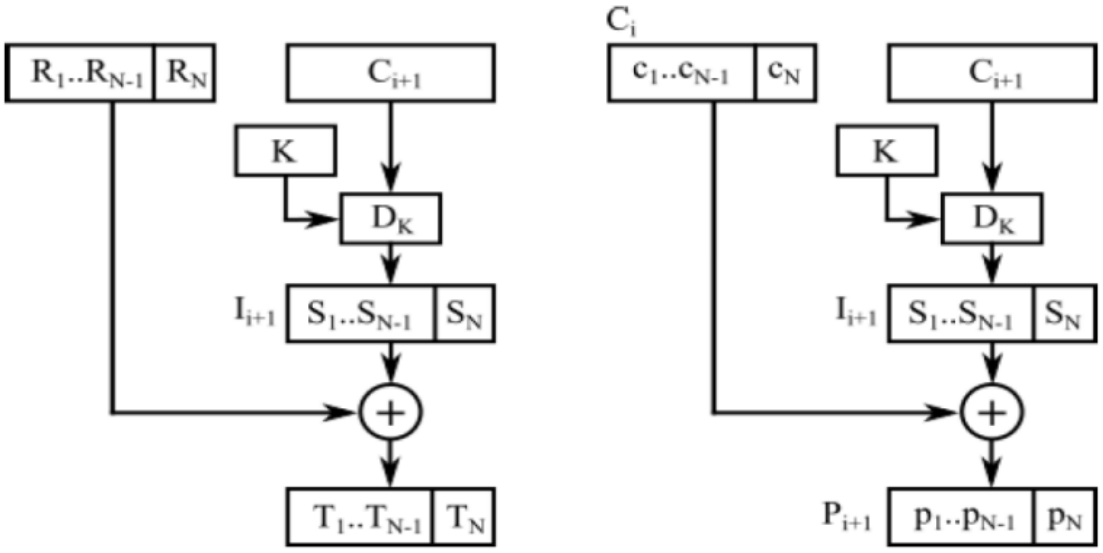


Рисунок 5.3

P_i – *открытый текст,* C_i – *шифротекст,* I_i – *промежуточное состояние ,* K *– ключ,* D_K *– функция расшифровки,* T_i *– формируемое дополнение.*

2. Формируем R – все биты, кроме двух последних, случайные значения. $R_n = S_n \oplus 0x02$, чтобы $T_n = 02$. Перебираем байт R_n−1 от 0x00 до 0xFF, каждый раз посылая на сервер $[R||C_{i+1}]$. Если при некотором R_{n-2} сервер «одобряет», то $T_{n-1} = 02$, $Sn = R_{n-1} \oplus 0x02$, $p_{n-1} = S_{n-1} \oplus C_{n-1}$.

На третьем шаге пытаемся получить дополнение 030303, на четвертом – 04040404. После N шагов получаем полностью блок p_{i+1}.

В CrypTool 2 атака предсказанием дополнения реализована в три фазы:

- Фаза 1. Нахождение длины дополнения, т.е. последний байт;
- Фаза 2. Подбор дополнения;
- Фаза 3. Расшифровка текста.

Ход работы.

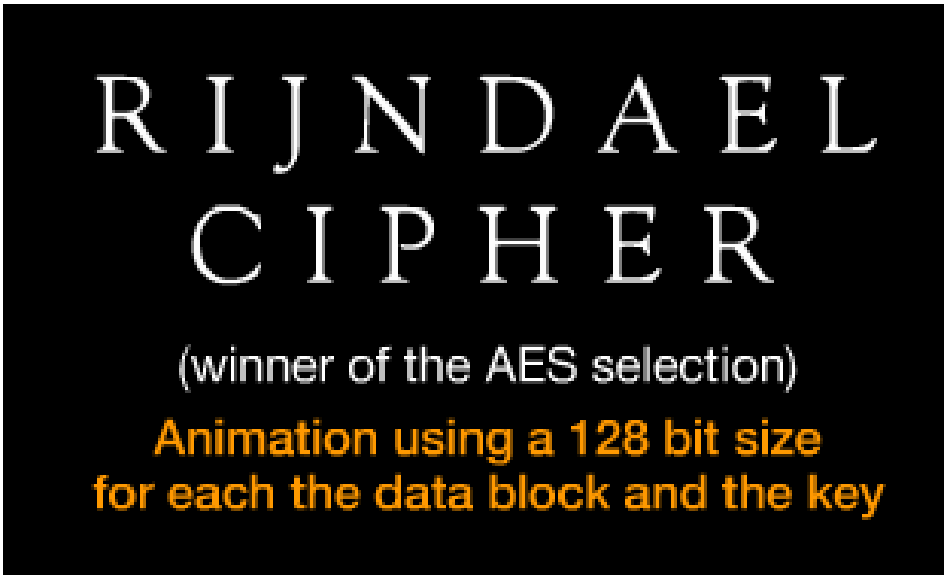
Исследование преобразований AES.

Задание.

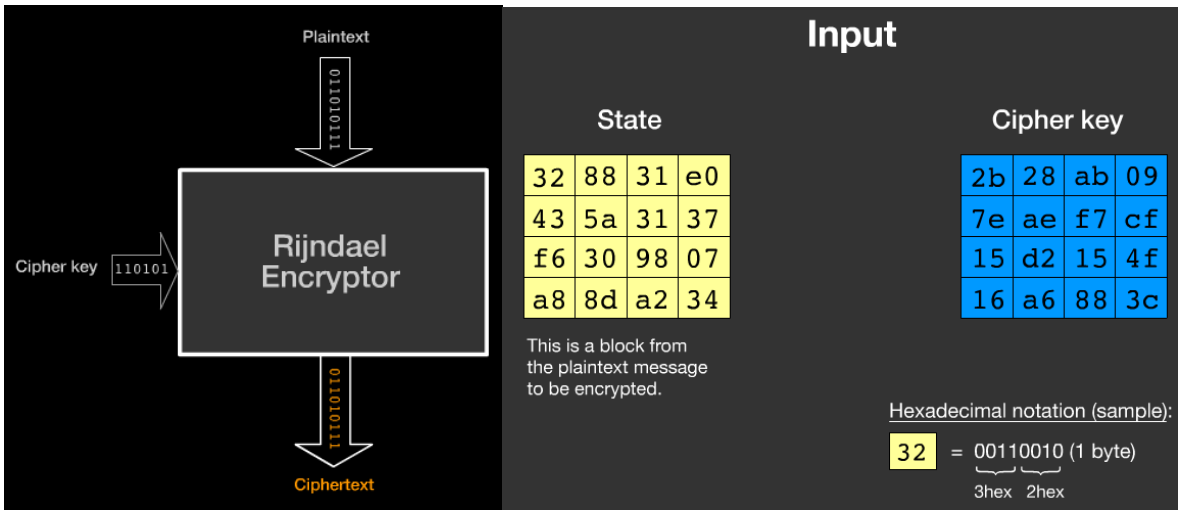
1. Изучить преобразования шифра AES с помощью демонстрационного приложения из Cryptool 1 (Indiv.Procedures -> Visualization -> AES -> Rijndael Animation);
2. Выполнить вручную преобразования для одного раунда и вычисление раундового ключа при следующих исходных данных:
    a. Открытый текст – фамилия_имя (транслитерация латиницей);
    b. Ключ – номер группы_отчество;
3. Проверить полученные результаты с помощью приложения инспектора (Indiv.Procedures -> Visualization -> AES -> Rijndael Inspector);
4. Провести наблюдения в потоковой модели шифра AES с помощью демонстрационного приложения из CrypTool 1 для 0-текста и 0-ключа (Indiv.Procedures -> Visualization -> AES -> Rijndael Flow Visualisation).

Изучение преобразования шифра AES.

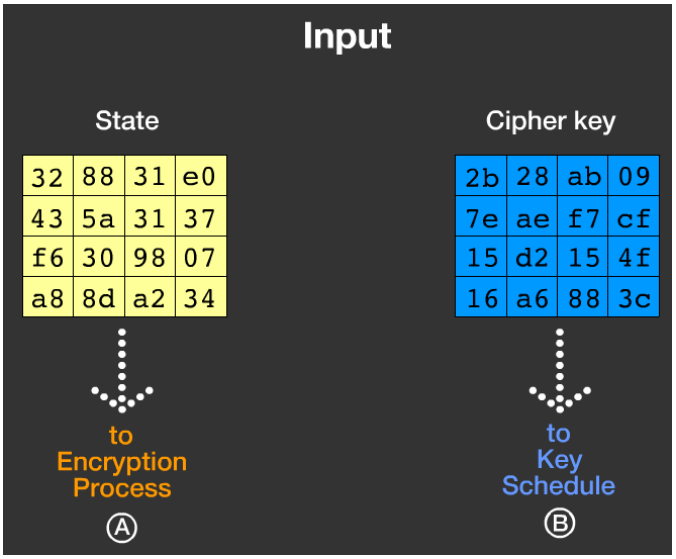
Изучим преобразования AES при помощи демонстрационного приложения из Cryptool 1. Как видно из первого кадра, демонстрироваться будет шифр AES с 128-битным блоком и ключом:



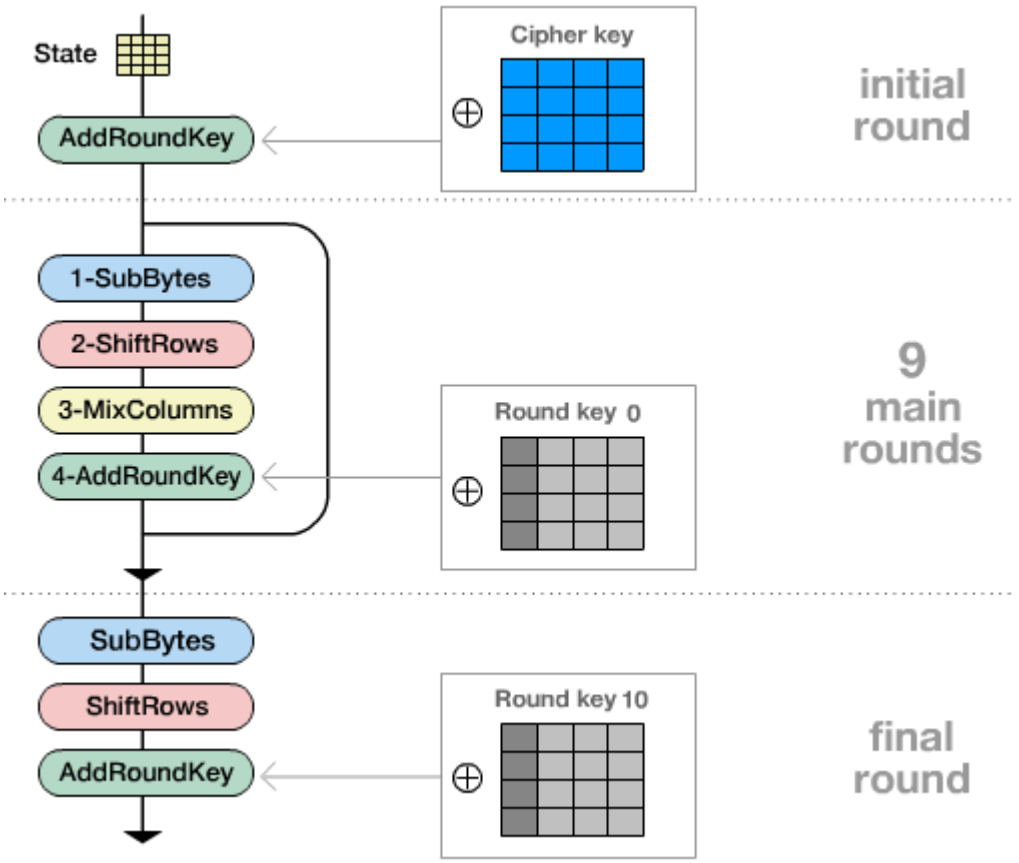
Далее показывается обобщенная схема шифрования. На вход шифру поступает 128-битный блок данных и 128-битный ключ, которые представлены в виде матриц 4 на 4:



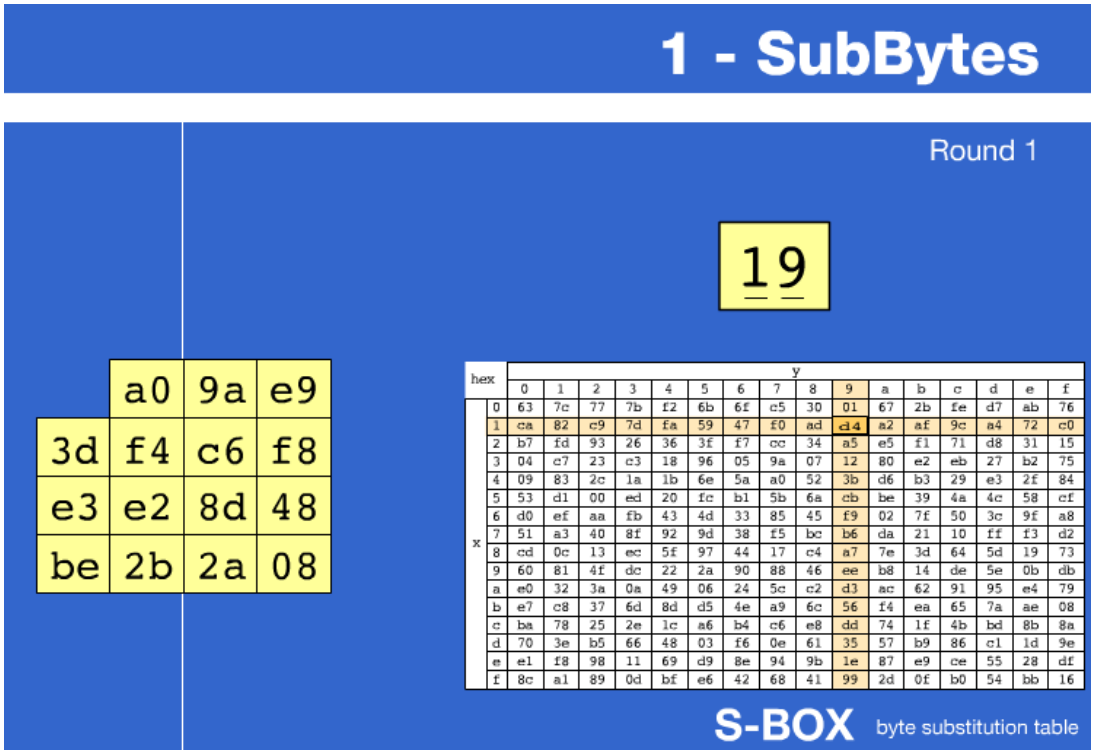
Матрица состояний подается на раундовые преобразования, а ключ – на процедуру генерации раундовых ключей:



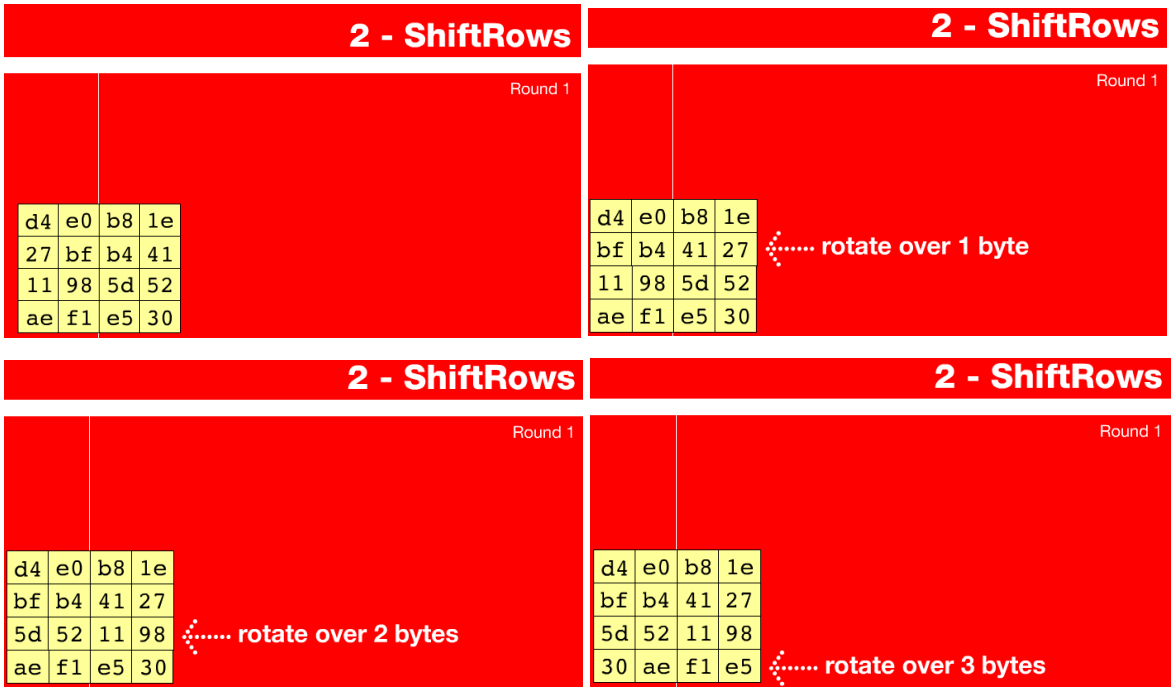
В процессе шифрования матрица состояний преобразуется при помощи 10 раундов. Раунды состоят из четырех последовательных преобразований: *SubBytes*, *ShiftRows*, *MixColumns* и *AddRoundKey*, при этом последний раунд не включает в себя *MixColumns*. Перед раундовыми преобразованиями матрицы данных на «initial round» производится преобразование *AddRoundKey*, только с исходным ключом. Следующие десять раундов используют раундовые ключи. Схема представлена на следующем рисунке:



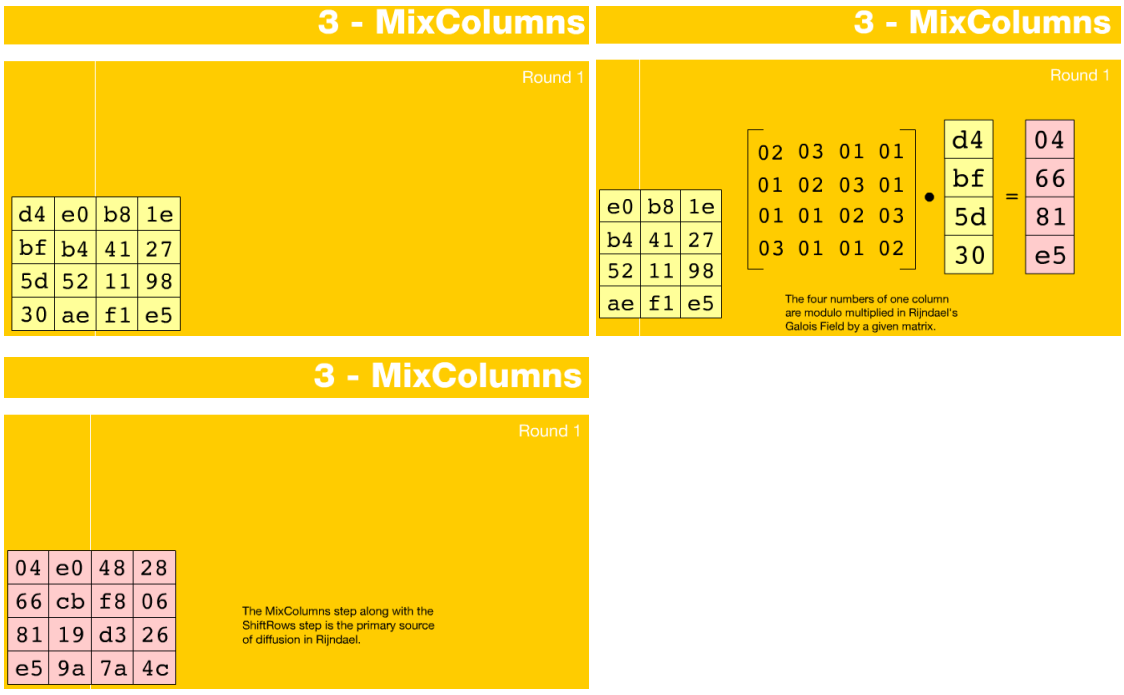
Далее рассматриваются раундовые преобразования. Первое преобразование – *SubBytes*. На нем осуществляется замена байтов матрицы состояний при помощи таблицы замены:



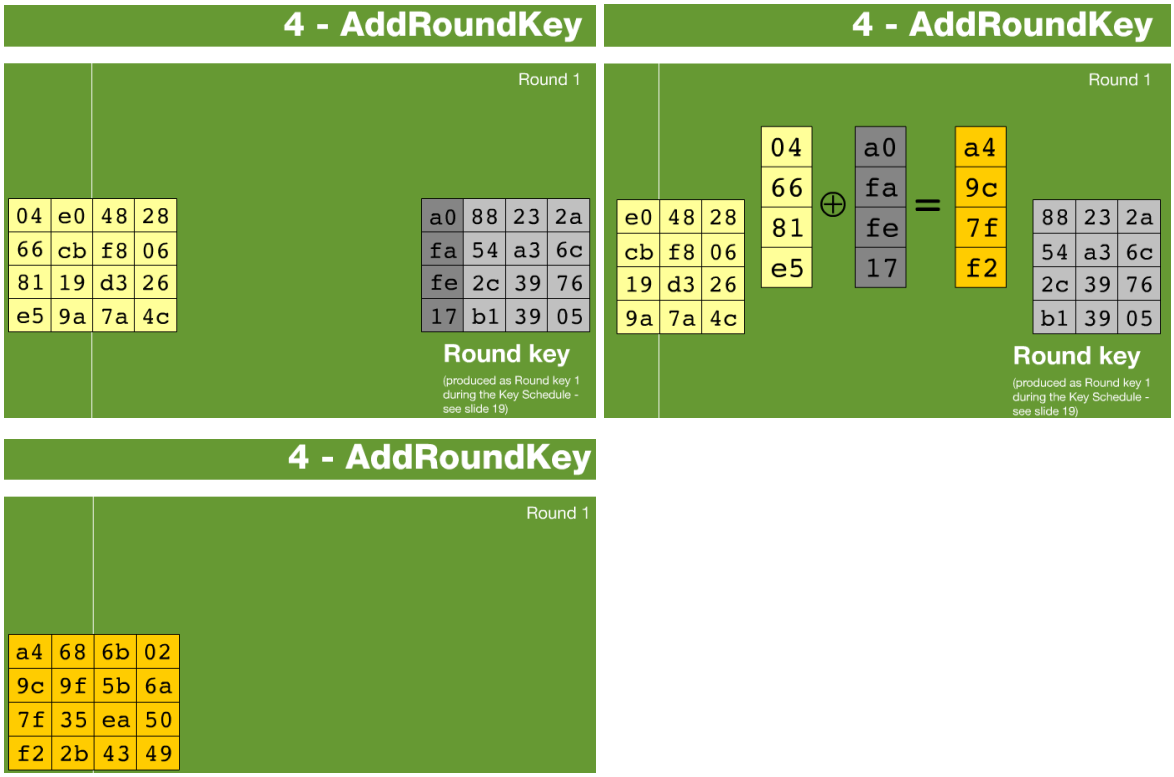
Второе преобразование – *ShiftRows*. На нем происходит побайтовый сдвиг строк матрицы состояний. Размер сдвига определяется индексом строки:



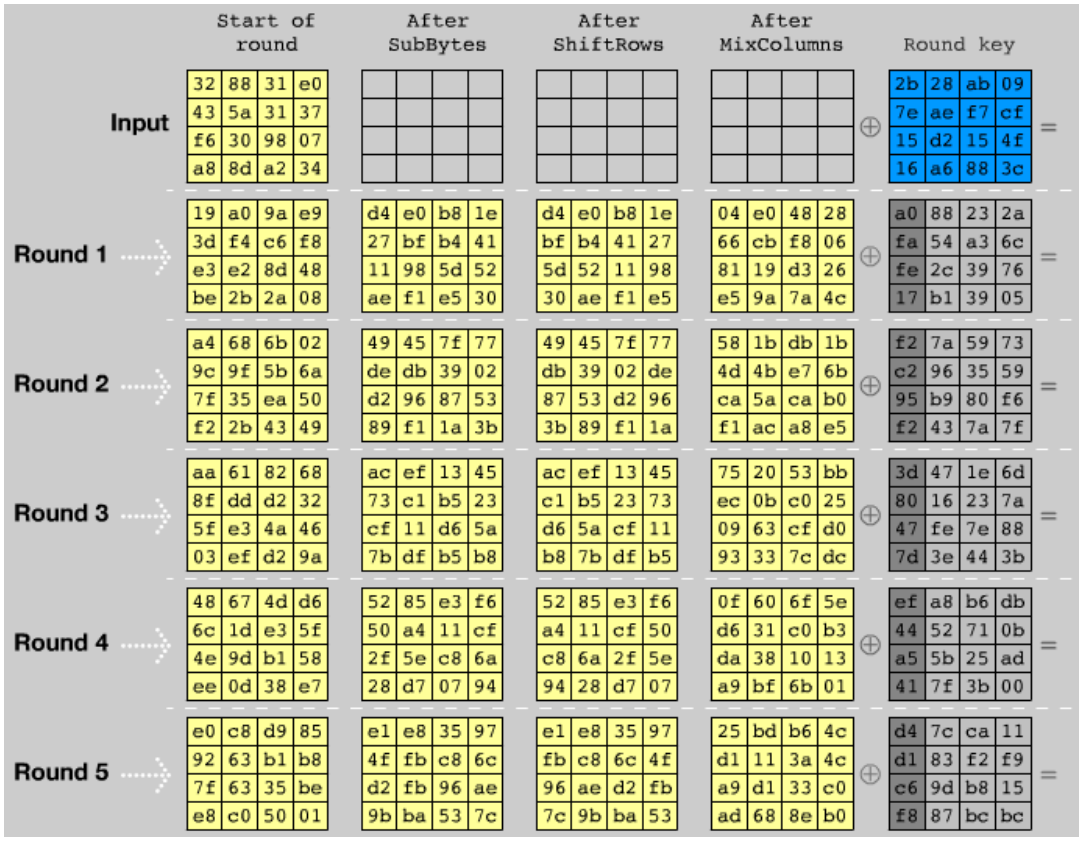
Третье преобразование – *MixColumns*. На нем происходит смешивание столбцов матрицы состояний путем ее умножения на матрицу констант в конечном поле $GF(2^8)$:

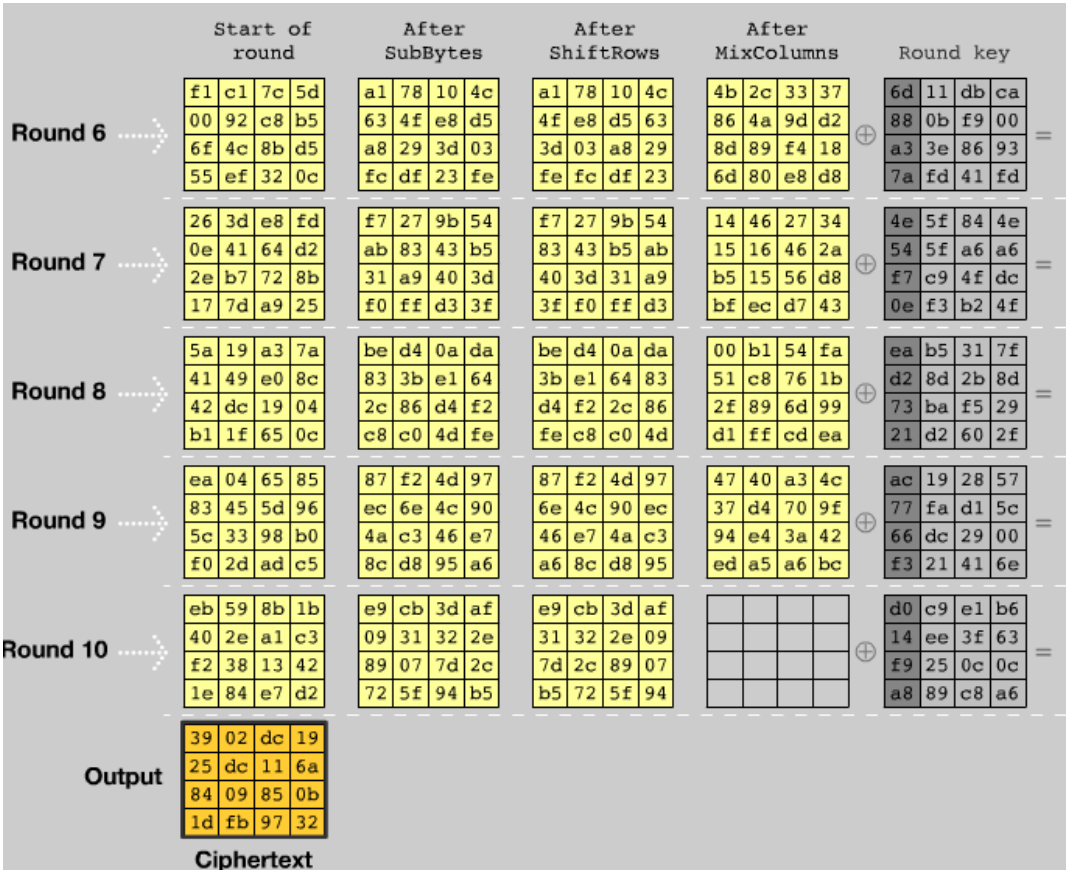


Четвертое преобразование – *AddRoundKey*. На нем происходит сложение по модулю 2 матрицы состояний с раундовым ключом:

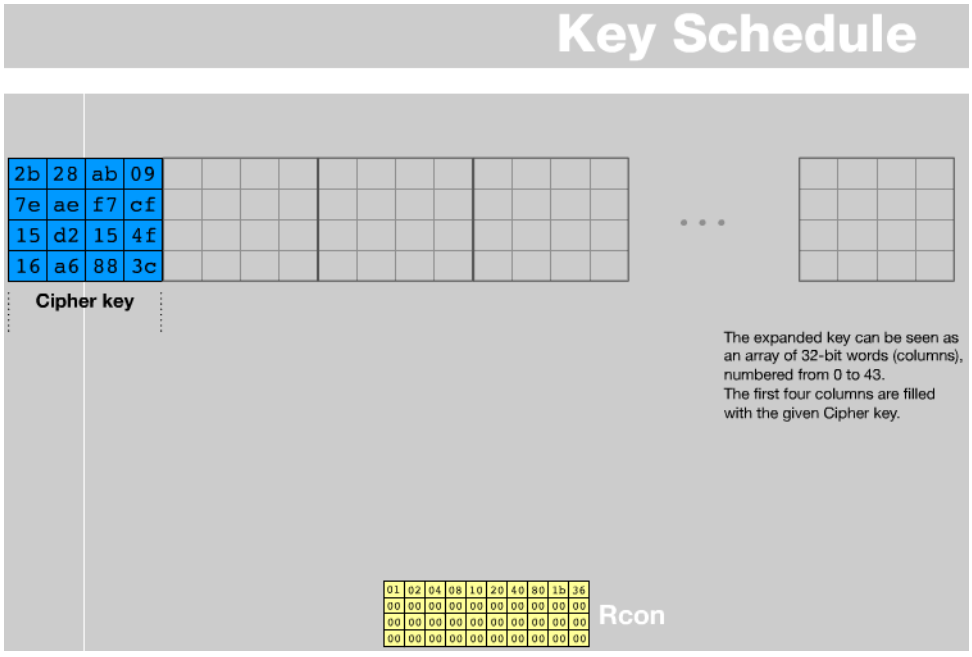


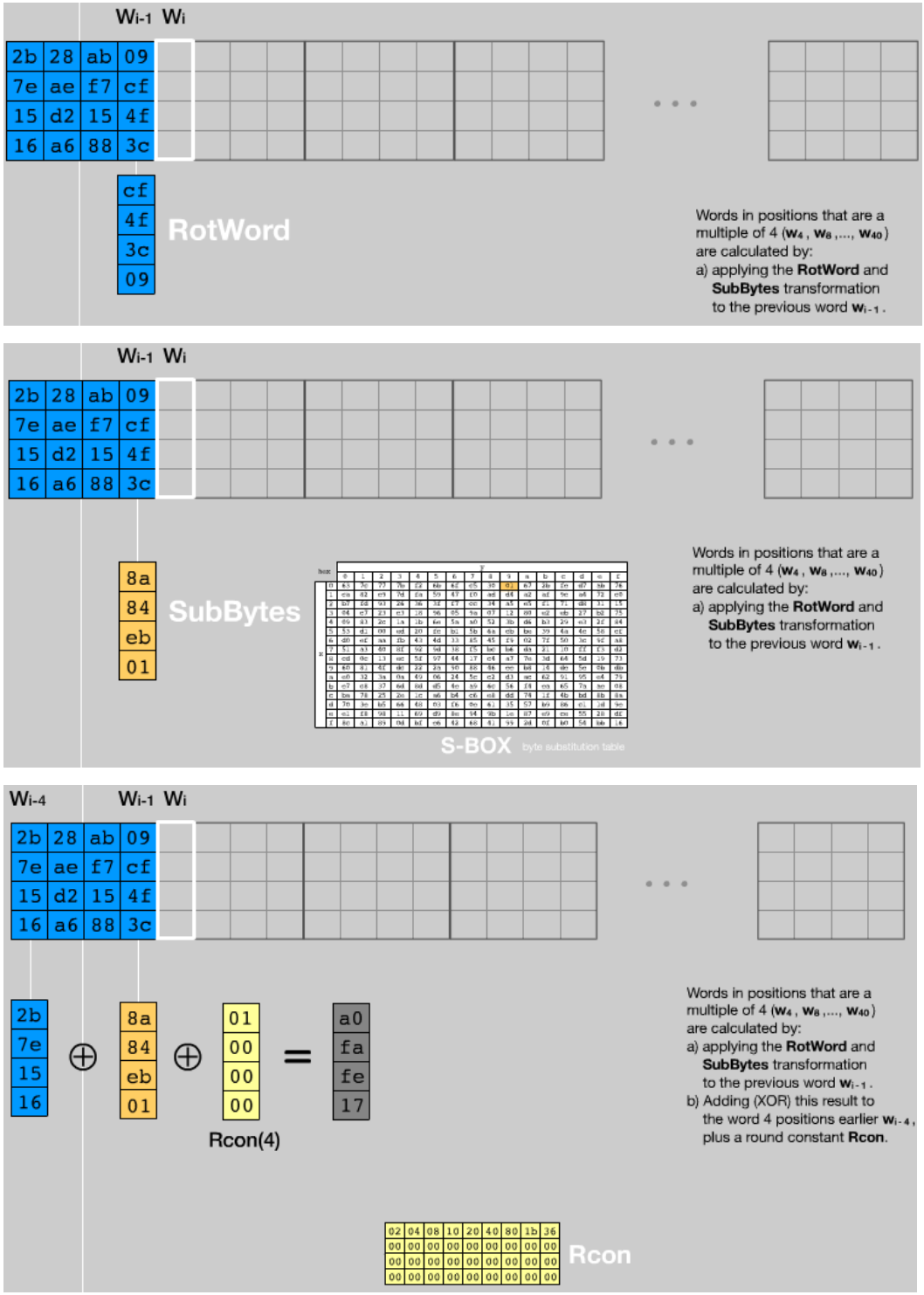
Результаты раундовых преобразований:



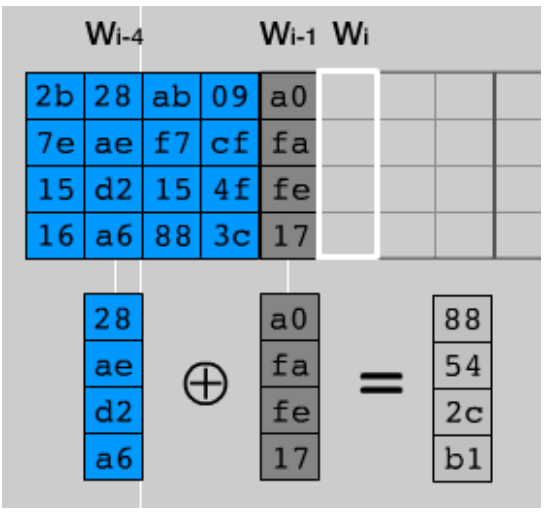


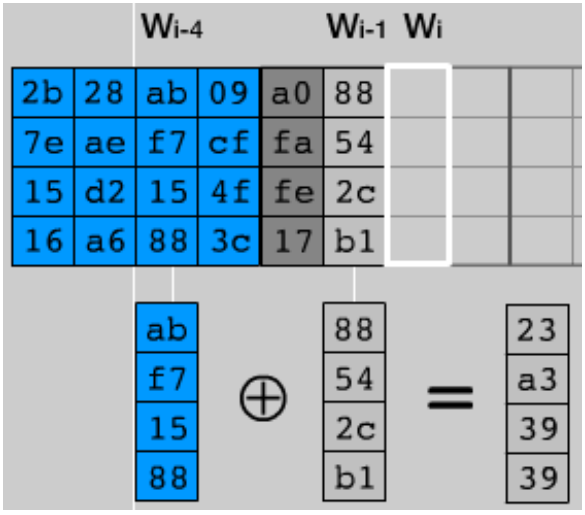
Далее рассматривается генерация 11 раундовых ключей. Для генерации следующего столбца ключа берется предыдущий, для него применяется преобразование *RotWord* (циклический сдвиг верх) и *SubBytes* (замена байтов по таблице замены), после чего результат складывается по модулю 2 со столбцом, стоящим на 4 позиции позади, и со соответствующим столбцом матрицы *Rcon*:

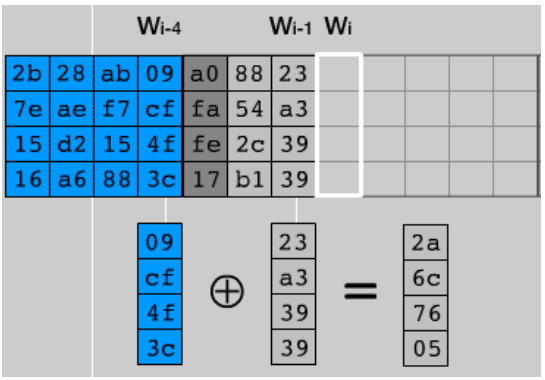


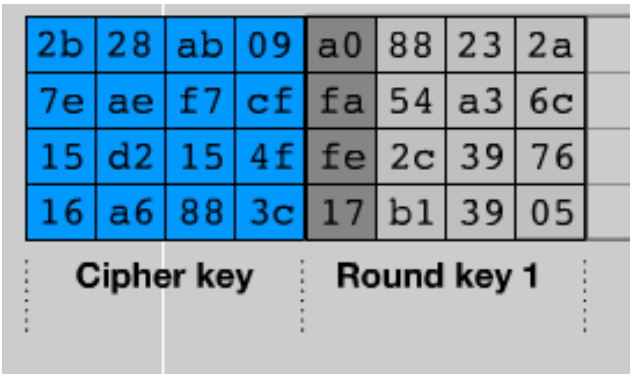


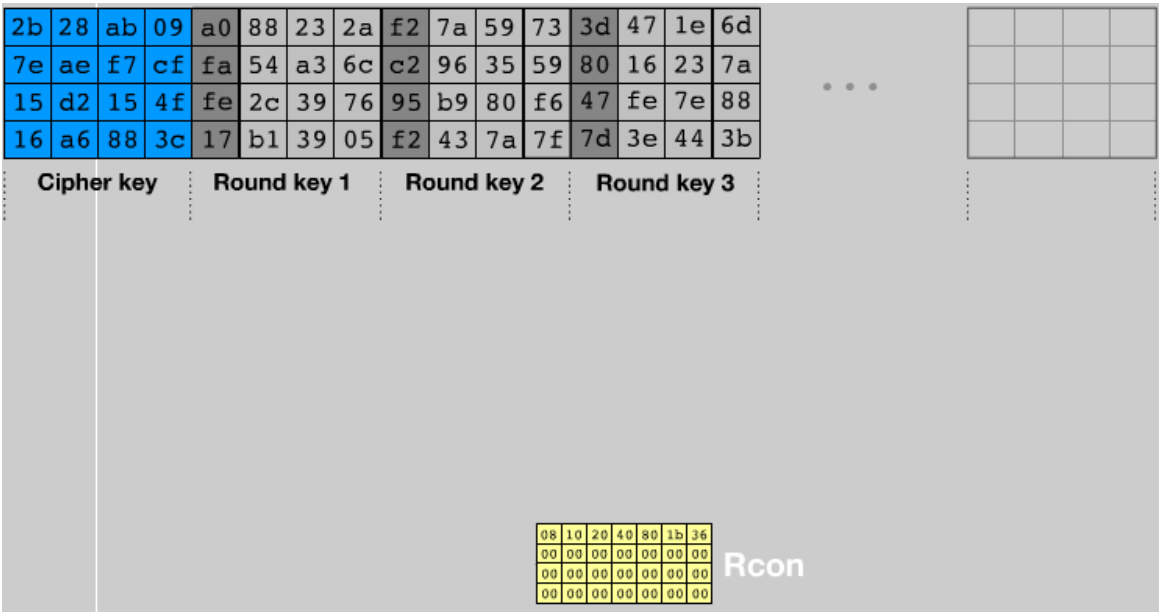
После генерации первого столбца, следующие три генерируются при помощи сложения по модулю два со столбцом, стоящим на 4 позиции позади. Для генерации пятого-восьмого столбцов и следующих четверок осуществляются аналогичные действия.

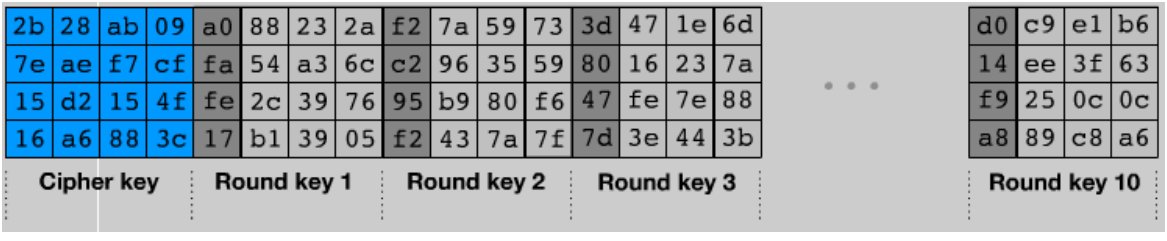












На этом демонстрация преобразований окончена.

Ручное преобразование первого раунда шифра AES.

Теперь выполним ручное преобразование первого раунда шифра AES и вычисление первого раундового ключа при следующих исходных данных:

А. Открытый текст – текст «KOLOVANOV_RODION»;

Б. Ключ – текст «9381_ALEKSEEVICH».

Для начала преобразуем исходные данные к бинарному виду:

Буква	Код ASCII	Двоичный код	HEX код
K	75	01001011	4B
O	79	01001111	4F
L	76	01001100	4C
O	79	01001111	4F
V	86	01010110	56
A	65	01000001	41
N	78	01001110	4E
O	79	01001111	4F
V	86	01010110	56
_	95	01011111	5F
R	82	01010010	52
O	79	01001111	4F
D	68	01000100	44
I	73	01001001	49
O	79	01001111	4F
N	78	01001110	4E

Буква	Код ASCII	Двоичный код	HEX код
9	57	00111001	39
3	51	00110011	33
8	56	00111000	38

1	49	00110001	31
_	95	01011111	5F
A	65	01000001	41
L	76	01001100	4C
E	69	01000101	45
K	75	01001011	4B
S	83	01010011	53
E	69	01000101	45
E	69	01000101	45
V	86	01010110	56
I	73	01001001	49
C	67	01000011	43
H	72	01001000	48

Получаем входной 128-битный блок для шифрования и 128-битный ключ. Представим данные в виде матриц 4 на 4:

4B	56	56	44
4F	41	5F	49
4C	4E	52	4F
4F	4F	4F	4E

Матрица состояний (открытый текст)

39	5F	4B	56
33	41	53	49
38	4C	45	43
31	45	45	48

Ключ

Теперь найдем первый раундовый ключ:

39	5F	4B	56
33	41	53	49
38	4C	45	43
31	45	45	48

03	5C	17	41
29	68	3B	72
6A	26	63	20
80	C5	80	C8

C[4]	RotWord	SubBytes	C[1]	Rcon[1]	C[5]	C[2]	C[6]	C[3]	C[7]	C[4]	C[8]
56	49	3B	39	01	03	5F	5C	4B	17	56	41
49	43	1A	33	00	29	41	68	53	3B	49	72
43	48	52	38	00	6A	4C	26	45	63	43	20
48	56	B1	31	00	80	45	C5	45	80	48	C8

Итого, первый раундовый ключ равен:

03	5C	17	41
29	68	3B	72
6A	26	63	20
80	C5	80	C8

Далее выполним раундовое преобразование. Перед началом первого раунда необходимо сложить по модулю 2 матрицу состояний с исходным ключом:

4B	56	56	44
4F	41	5F	49
4C	4E	52	4F
4F	4F	4F	4E

МС

39	5F	4B	56
33	41	53	49
38	4C	45	43
31	45	45	48

Ключ

72	09	1D	12
7C	00	0C	00
74	02	17	0C
7E	0A	0A	06

Результат

Теперь можно начать первые раундовые преобразования. Выполним *SubBytes*:

72	09	1D	12
7C	00	0C	00
74	02	17	0C
7E	0A	0A	06

МС

40	01	A4	C9
10	63	FE	63
92	77	F0	FE
F3	67	67	6F

Результат

Выполним *ShiftRows*:

40	01	A4	C9
10	63	FE	63
92	77	F0	FE
F3	67	67	6F

МС

40	01	A4	C9
63	FE	63	10
F0	FE	F0	FE
6F	F3	67	67

Результат

Выполним *MixColumns*:

40	01	A4	C9
63	FE	63	10
F0	FE	F0	FE
6F	F3	67	67

МС

02	03	01	01
01	02	03	01
01	01	02	03
03	01	01	02

40
63
F0
6F

BA
E2
69
8D

02	03	01	01
01	02	03	01
01	01	02	03
03	01	01	02

01
FE
FE
F3

16
0C
16
FE

02	03	01	01
01	02	03	01
01	01	02	03
03	01	01	02

A4
63
F0
67

03
A8
51
C8

02	03	01	01
01	02	03	01
01	01	02	03
03	01	01	02

C9
10
FE
67

A9
17
9E
E9

BA	16	03	A9
E2	0C	A8	17
69	16	51	9E
8D	FE	C8	E9

Результат

Выполним *AddRoundKey*:

BA	16	03	A9
E2	0C	A8	17
69	16	51	9E
8D	FE	C8	E9

+

03	5C	17	41
29	68	3B	72
6A	26	63	20
80	C5	80	C8

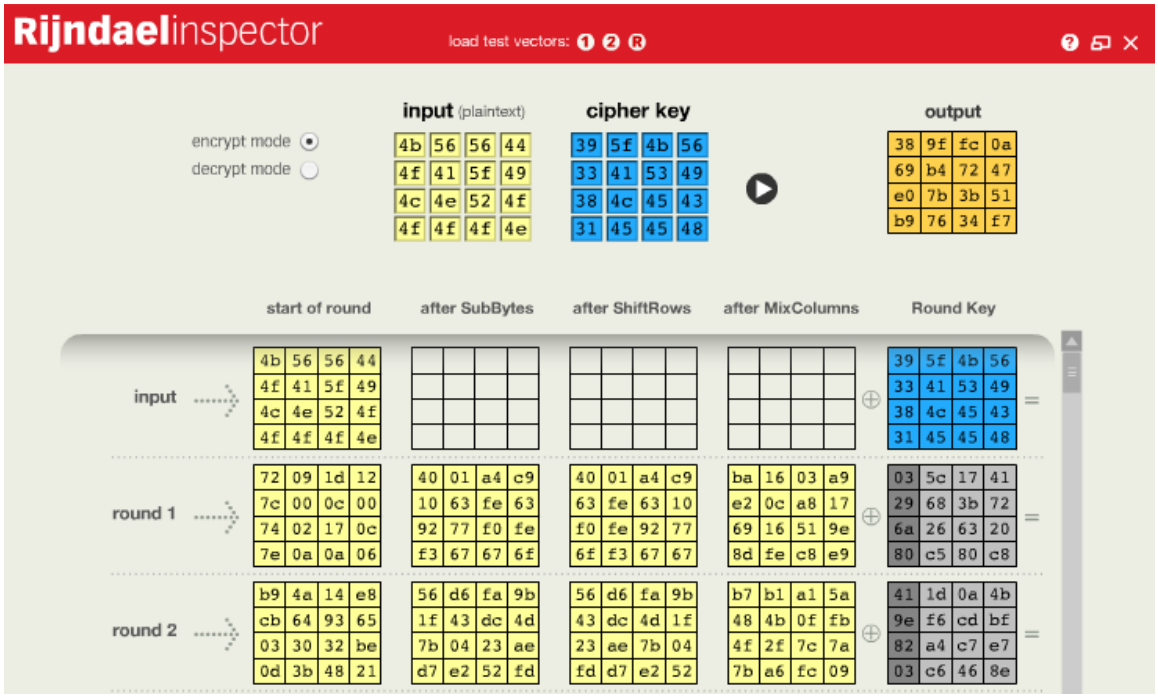
MC Первый раундовый ключ

Итого получаем:

B9	4A	14	E8
CB	64	93	65
03	30	32	BE
0D	3B	48	21

MC

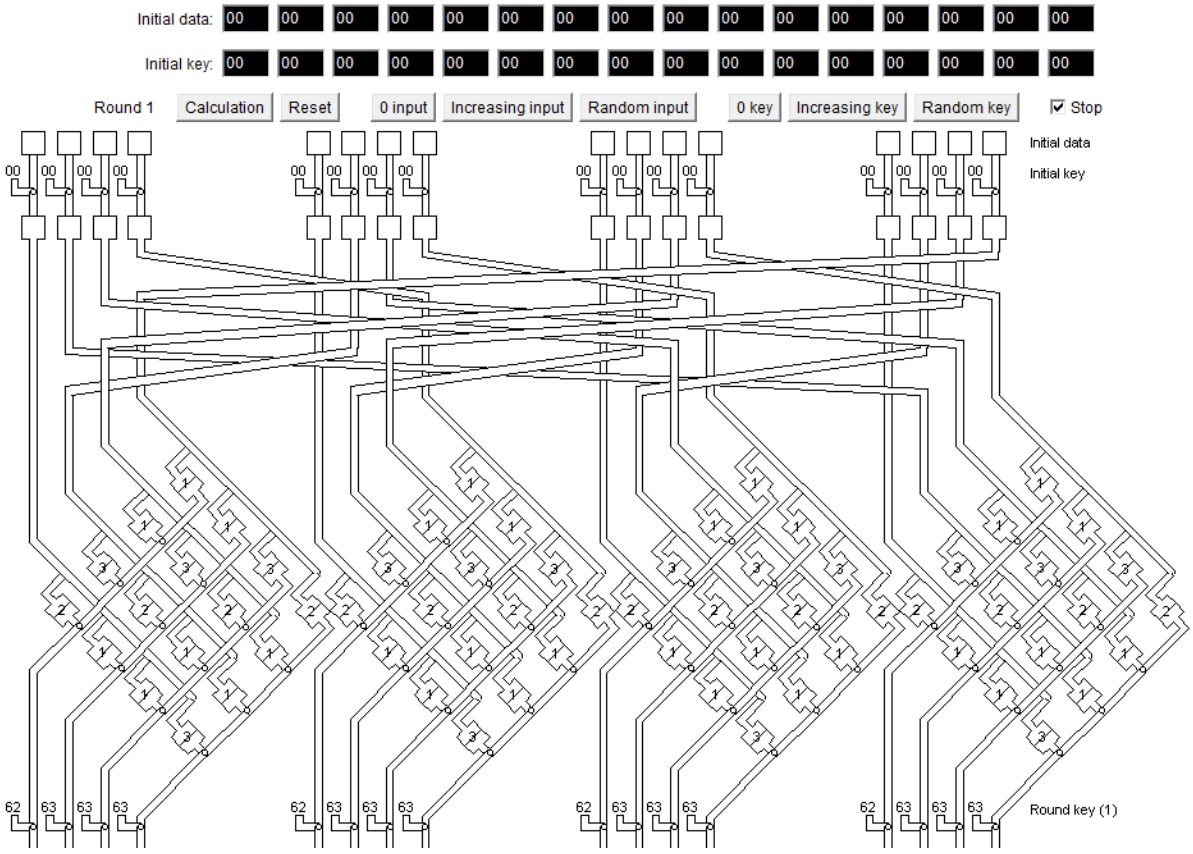
Проверим полученные результаты при помощи приложения инспектора из CrypTool 1:

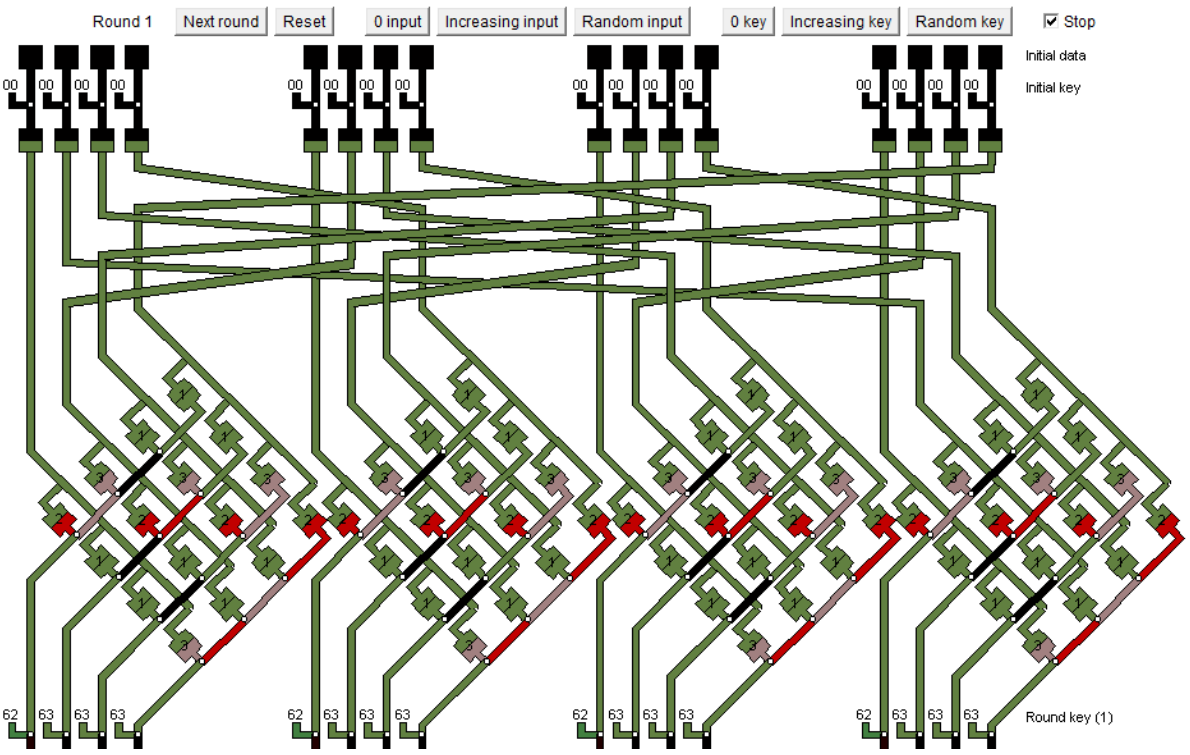


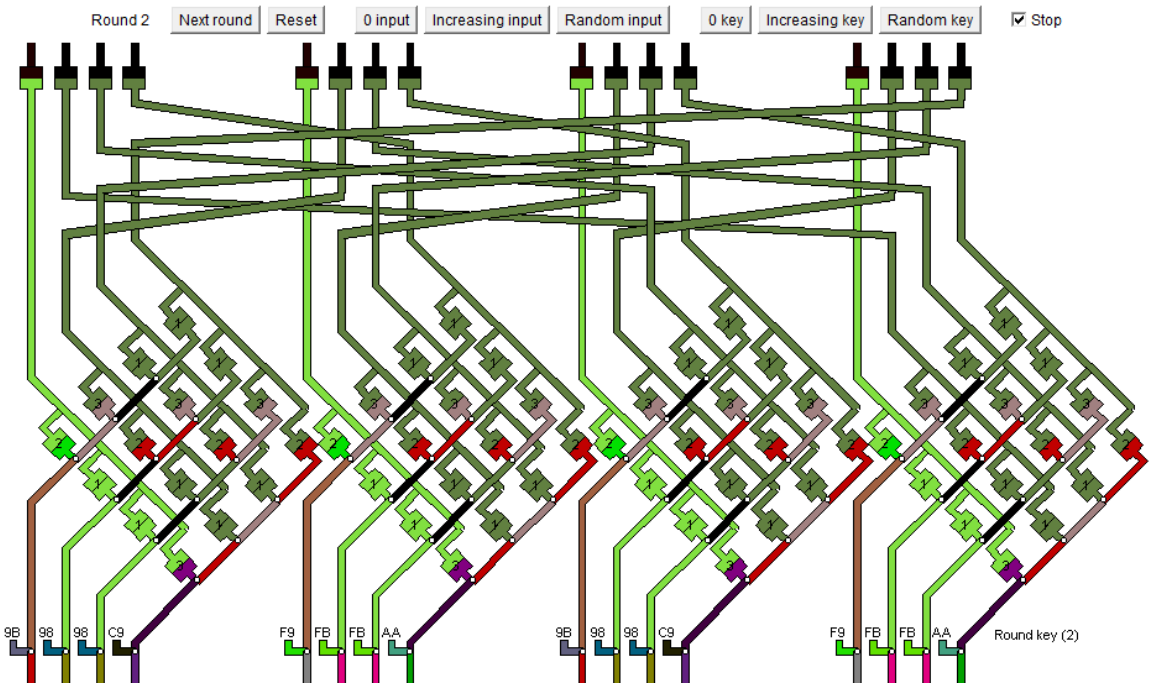
Как видно, полученные в ходе ручных преобразований промежуточные матрицы состояний совпадают.

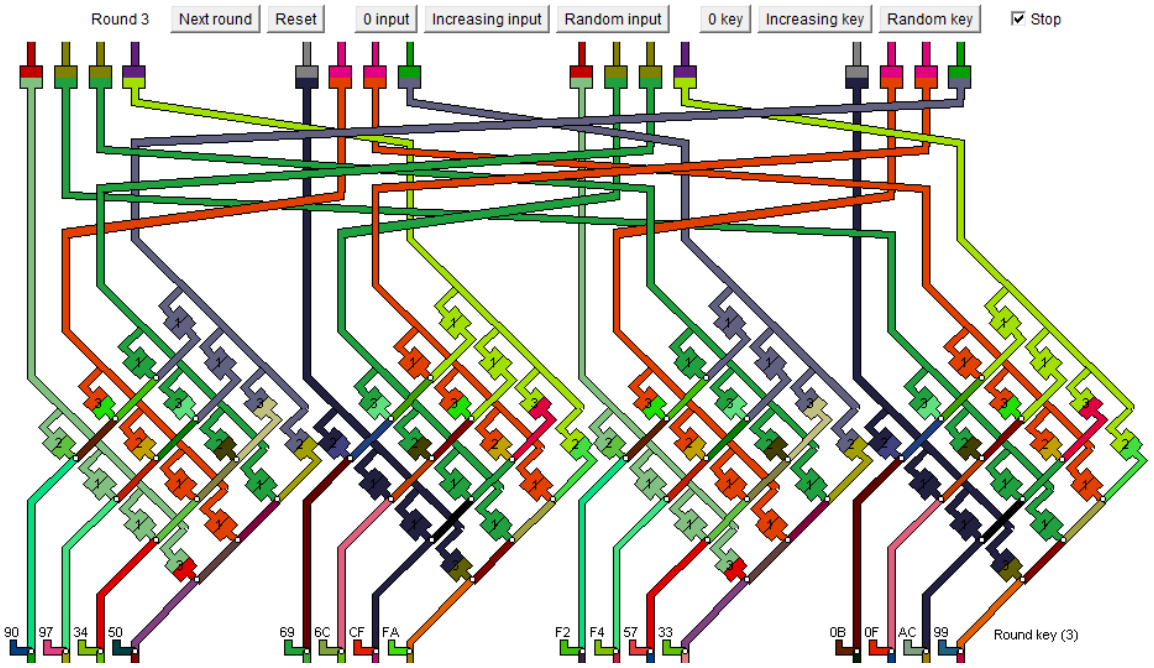
Наблюдения в потоковой модели шифра AES.

Проведем наблюдения в потоковой модели шифра AES при помощи демонстрационного приложения из CrypTool 1 для нулевого текста и нулевого ключа:

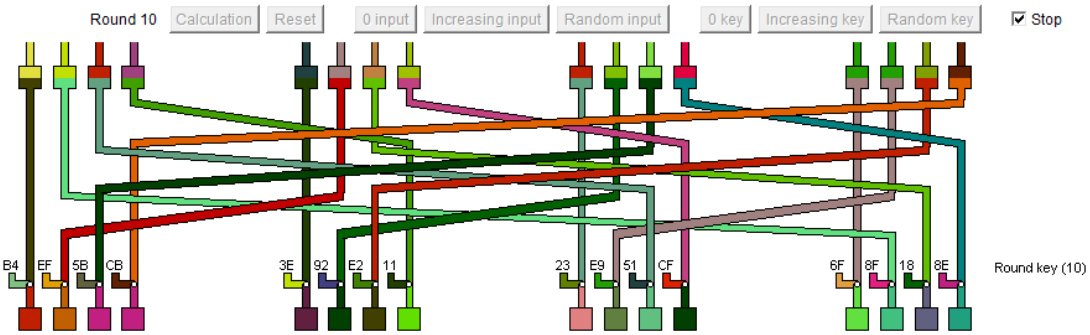

Initial data: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
Initial key: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
Round 1
Calculation
Reset
0 input
Increasing input
Random input
0 key
Increasing key
Random key
Stop
Initial data
Initial key
Round key (1)


Round 1
Next round
Reset
0 input
Increasing input
Random input
0 key
Increasing key
Random key
Stop
Initial data
Initial key
Round key (1)


Round 2
Next round
Reset
0 input
Increasing input
Random input
0 key
Increasing key
Random key
Stop
9B 98 98 C9
F9 FB FB AA
9B 98 98 C9
F9 FB FB AA
Round key (2)


Round 3
Next round
Reset
0 input
Increasing input
Random input
0 key
Increasing key
Random key
Stop
90 97 34 50
69 6C CF FA
F2 F4 57 33
0B 0F AC 99
Round key (3)

...


Round 10
Calculation
Reset
0 input
Increasing input
Random input
0 key
Increasing key
Random key
Stop
B4 EF 5B CB
3E 92 E2 11
23 E9 51 CF
6F 8F 18 8E
Round key (10)

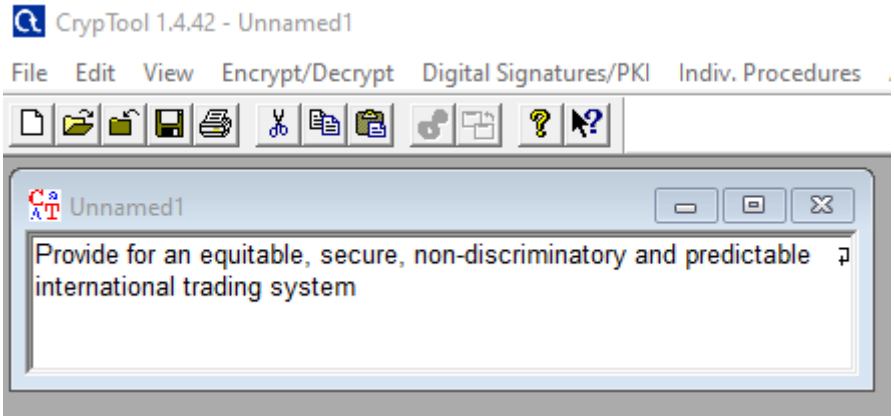
Исследование финалистов конкурса AES (Rijndael, MARS, RC6, Serpent, Twofish).

Задание.

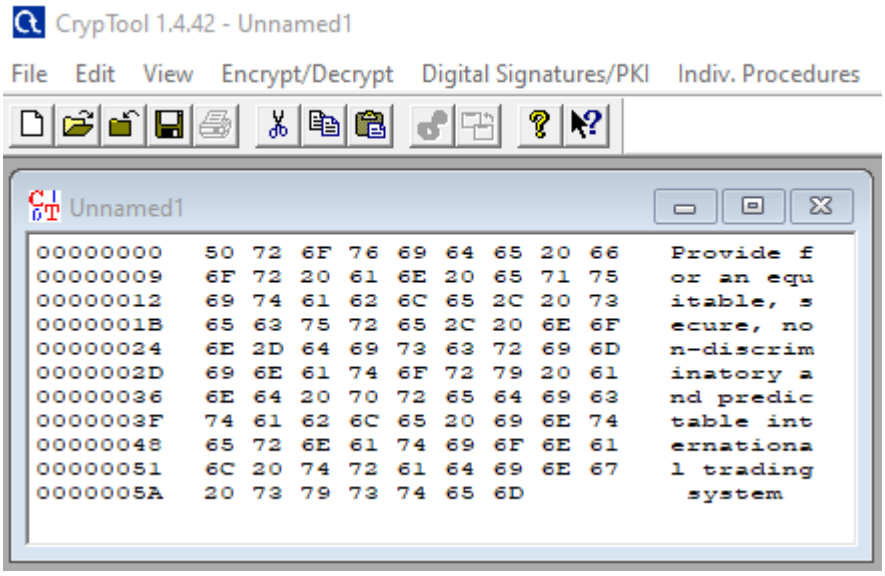
1. Выбрать текст на английском языке (не более 120 знаков);
2. Создать бинарный файл с этим текстом, зашифровав и расшифровав его шифром AES на 0-м ключе;
3. С помощью Cryptool 1 зашифровать с ключом отличным от 0 текст с использованием шифров AES, MARS, RC6, Serpent и Twofish;
4. Приложением из Cryptool 1 вычислить энтропию исходного текста и шифротекстов, полученных в итоге. Зафиксировать результаты измерений в таблице;
5. Приложением из Cryptool 1 оцените время проведения атаки «грубой силы» всех шифров для одного и того же шифротекста в случаях, когда известно n-2, n-4, n-6, ..., 2 байт секретного ключа. Зафиксировать результаты измерений в таблице.

Энтропия исходного текста и шифротекстов, полученных при помощи шифров AES, MARS, RC6, Serpent и Twofish.

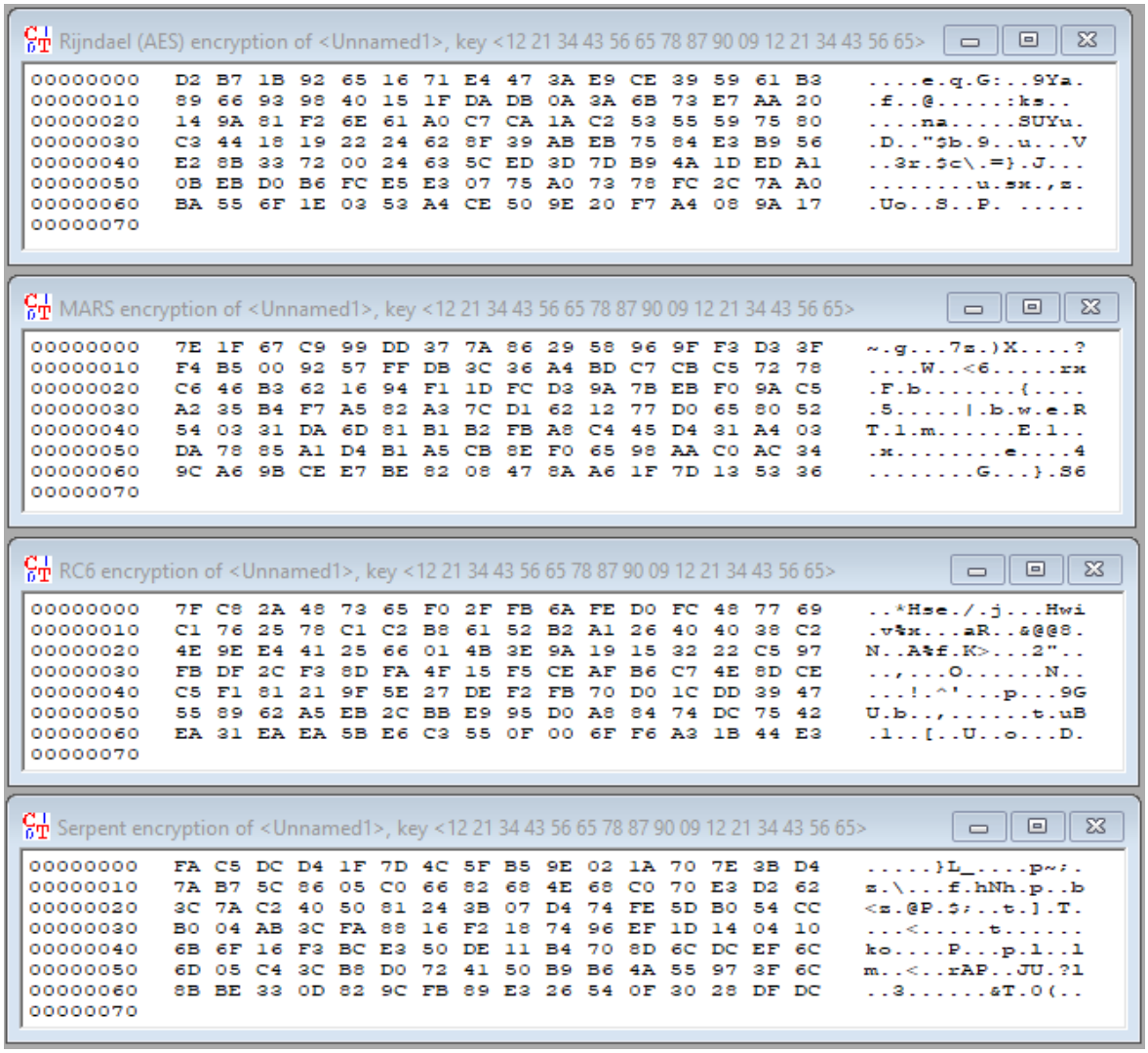
В качестве исходного текста был выбран следующий текст:

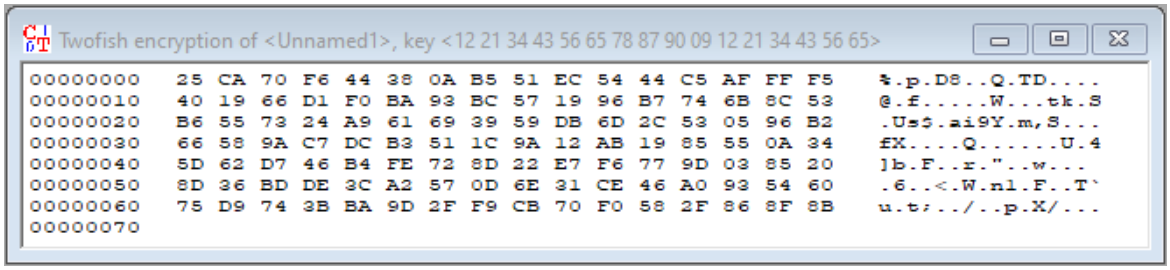


Бинарное представление выбранного текста:



Зашифруем с ключом «12 21 34 43 56 65 78 87 90 09 12 21 34 43 56 65» исходный текст с использованием шифров AES, MARS, RC6, Serpent и Twofish:





Вычислим энтропию для исходного текста и полученных шифротекстов при помощи инструментов CrypTool 1 и зафиксируем результаты в таблице:

Текст	Значение энтропии
Исходный текст	This document contains 24 different byte values (there are 256 different byte values). **The entropy of the whole document is 4.15 (maximum possible entropy 8.00).**
Шифротекст AES	This document contains 91 different byte values (there are 256 different byte values). **The entropy of the whole document is 6.41 (maximum possible entropy 8.00).**
Шифротекст MARS	This document contains 93 different byte values (there are 256 different byte values). **The entropy of the whole document is 6.46 (maximum possible entropy 8.00).**
Шифротекст PC6	This document contains 94 different byte values (there are 256 different byte values). **The entropy of the whole document is 6.46 (maximum possible entropy 8.00).**
Шифротекст Serpent	This document contains 85 different byte values (there are 256 different byte values). **The entropy of the whole document is 6.27 (maximum possible entropy 8.00).**
Шифротекст Twofish	This document contains 88 different byte values (there are 256 different byte values). **The entropy of the whole document is 6.37 (maximum possible entropy 8.00).**

Как видно из результатов, для исходного текста значение энтропии самое низкое (4.15 из 8), а используемые значения байт охватывают лишь 24 из 256 возможных значений. Для шифров AES, MARS, PC6, Serpent и Twofish энтропия

отличается не сильно: самая большая энтропия у шифротекстов MARS и PC6 (6.46 из 8), самая маленькая энтропия у шифротекста Serpent (6.27 из 8), у шифротекста Twofish – 6.37 из 8, у шифра AES – 6.41 из 8.

Оценка времени проведения атаки «грубой силы» на шифры AES, MARS, RC6, Serpent и Twofish при различном количестве известных байт ключа.

Оценим время проведения атаки «грубой силы» на шифры AES, MARS, RC6, Serpent и Twofish при 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 известных байт ключа с использованием CrypTool 1 и зафиксируем результаты в таблице:

Количество известных байт	Время проведения атаки «грубой силы»				
	AES	MARS	RC6	Serpent	Twofish
2	~ $2.4 * 10^{20}$ лет	~ $3.6 * 10^{20}$ лет	~ $2.4 * 10^{20}$ лет	~ $6.5 * 10^{20}$ лет	~ $4.8 * 10^{20}$ лет
4	~ $3.7 * 10^{15}$ лет	~ $5.5 * 10^{15}$ лет	~ $3.7 * 10^{15}$ лет	~ 10^{16} лет	~$7.4 * 10^{15}$ лет
6	~ $5.6 * 10^{10}$ лет	~ $8.4 * 10^{10}$ лет	~ $5.7 * 10^{10}$ лет	~ $1.6 * 10^{11}$ лет	~ $1.2 * 10^{11}$ лет
8	~ $8.5 * 10^{5}$ лет	~ $1.3 * 10^{6}$ лет	~ $8.6 * 10^{5}$ лет	~ $2.4 * 10^{6}$ лет	~ $1.7 * 10^{6}$ лет
10	~ 13 лет	~ 20 лет	~ 13 лет	~ 36 лет	~ 27 лет
12	~ 1 час 45 минут	~ 2 часа 36 минут	~ 1 час 45 минут	~ 4 часа 50 минут	~ 3 часа 32 минуты
14	~ 0.1 секунд	~ 0.1 секунд	~ 0.1 секунд	~ 0.3 секунд	~ 0.1 секунд

Как видно из результатов, самое большое время проведения атаки показал шифр Serpent – во всех рассматриваемых вариантах он показал наибольшее время атаки. Шифры AES и RC6 показали почти одинаковые результаты, при этом во всех рассматриваемых вариантах они показали наименьшее время атаки.

Между ними в порядке увеличения времени проведения атаки «грубой силы» идут шифры MARS и Twofish.

Атака «грубой силы» на AES.

Задание.

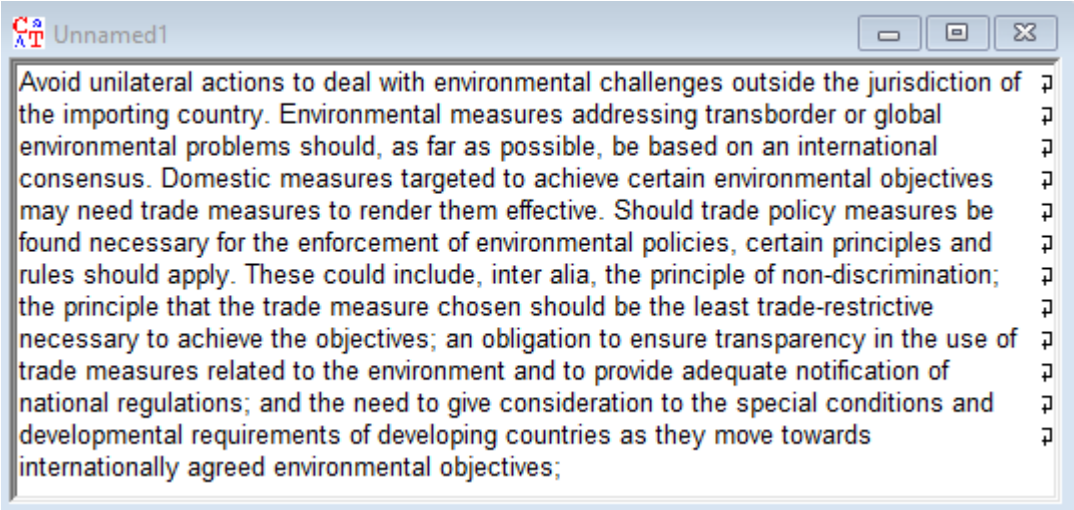
1. Найти и запустить шаблон атаки в CrypTool 2 (AES Analysis using Entropy);
2. Выбрать открытый текст (примерно 1000 знаков) и загрузить его в шаблон;
3. Провести атаку «грубой силы» когда известно n-2, n-4, n-6 байт секретного ключа, используя в качестве оценочной функции энтропию и задействовав 1 ядро процессора. Зафиксировать затраты времени;
4. Сформировать текст с произвольным сообщением в формате «DEAR SIRS message THANKS» и загрузить его в шаблон;
5. Провести атаку «грубой силы» когда известно n-2, n-4, n-6 байт секретного ключа, используя в качестве оценочной функции 34 словосочетание DEAR SIRS задействовав 1 ядро процессора. Зафиксировать затраты времени;
6. Выполнить атаку повторно с средним и максимальным количеством процессорных ядер. Зафиксировать затраты времени.

Энтропийная атака «грубой силы» на шифр AES при различном количестве известных байт ключа.

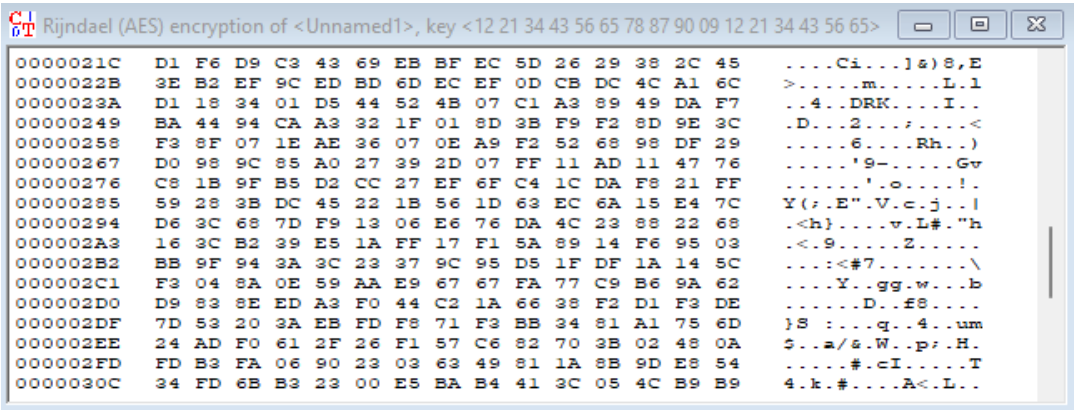
Для проведения атаки «грубой силы» будет использоваться шаблон «AES Analysis using Entropy» из CrypTool 2:

This template shows how to use a brute-force search to attack an AES-encrypted text.
The Keysearcher component searches a subspace of the AES keyspace and uses the entropy of the decrypted plaintexts to find the correct one.
The plaintext that has the lowest entropy will rank first in the bestlist.
As input, the Keysearcher receives a ciphertext, which was entered hex-encoded.

В качестве исходного текста был выбран следующий текст:



Исходный текст был зашифрован с ключом «12 21 34 43 56 65 78 87 90 09 12 21 34 43 56 65»:

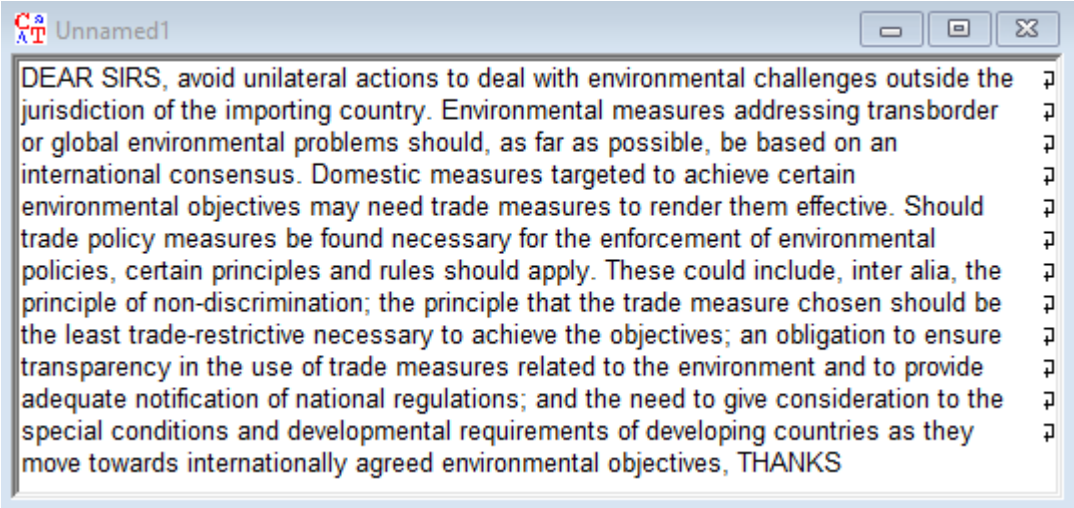


Зафиксируем затраты времени при проведении атаки «грубой силы», когда известно 14, 12, 10 байт секретного ключа, использующую в качестве оценочной функции энтропию и 1, 4 и 8 ядер процессора:

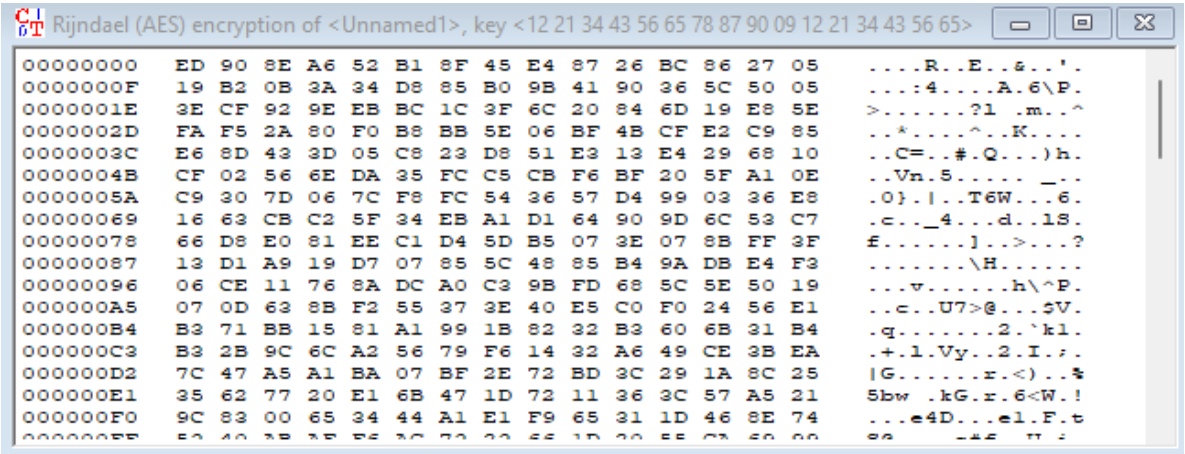
Количество известных байт ключа	Затраты времени		
	1 ядро	4 ядра	8 ядер
10	~ 6220 дней	~ 1777 дней	~ 1036 дней
12	~ 2 часа 16 минут	~ 38 минут	~ 23 минуты
14	~ 1 секунда	~ 1 секунда	~ 1 секунда

Текстовая атака «грубой силы» на шифр AES при различном количестве известных байт ключа.

В качестве исходного текста был выбран следующий текст:



Исходный текст был зашифрован с ключом «12 21 34 43 56 65 78 87 90 09 12 21 34 43 56 65»:



Зафиксируем затраты времени при проведении атаки «грубой силы», когда известно 14, 12, 10 байт секретного ключа, использующую в качестве оценочной функции словосочетание DEAR SIRS и 1, 4 и 8 ядер процессора:

Количество известных байт ключа	Затраты времени		
	1 ядро	4 ядра	8 ядер
10	~ 3827 дней	~ 1130 дней	~ 721 день
12	~ 1 час 24 минуты	~ 23 минуты	~14 минут
14	~ 1 секунда	~ 1 секунда	~ 1 секунда

Как видно из результатов, использование в качестве оценочной функции словосочетание DEAR SIRS из исходного текста значительно ускоряет поиск по сравнению с использованием в качестве оценочной функции энтропии (примерно в 1.6 раза быстрее). При увеличении количества используемых ядер процессора поиск также значительно ускоряется.

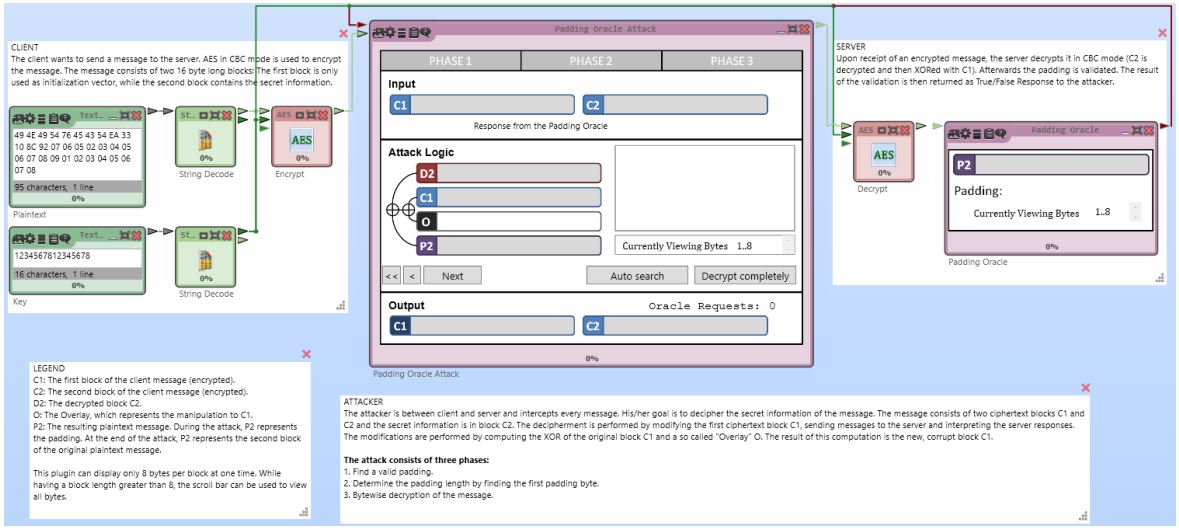
Атака предсказанием дополнения на шифр AES в режиме CBC (Padding Oracle Attack).

Задание.

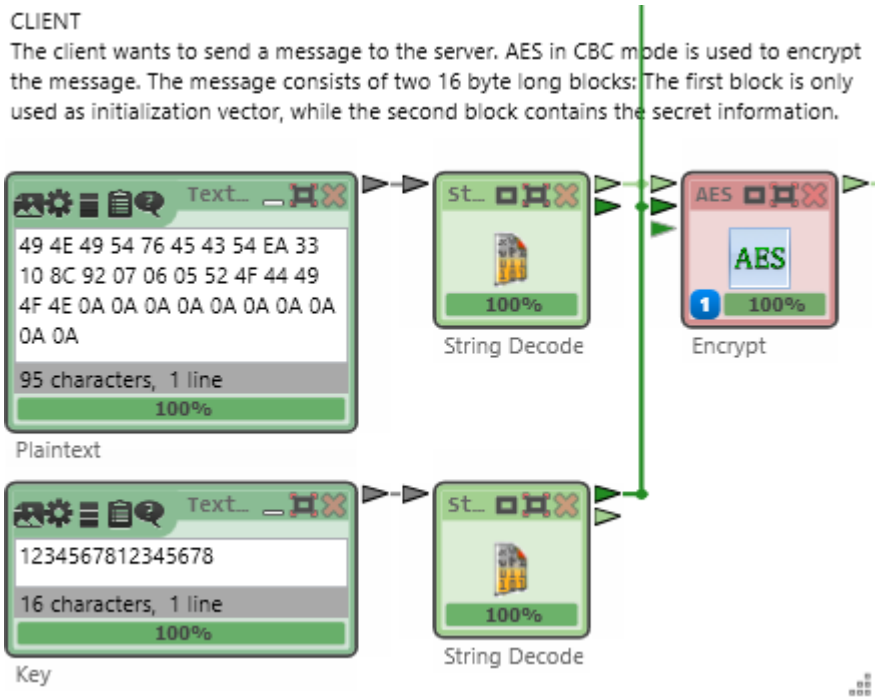
1. Найти и запустить шаблон атаки в CrypTool 2 (Padding Oracle Attack on AES);
2. Подготовьтесь к атаке теоретически:
    a. Изучите комментарии к шаблону;
    b. Изучите публикацию;
3. Внедрите во второй блок исходного текста коды символов своего имени;
4. Выполните 3 фазы атаки и сохраните итоговые скриншоты по окончанию каждой фазы;
5. Убедитесь, что атака удалась.

Атака предсказанием дополнения на шифр AES в режиме CBC.

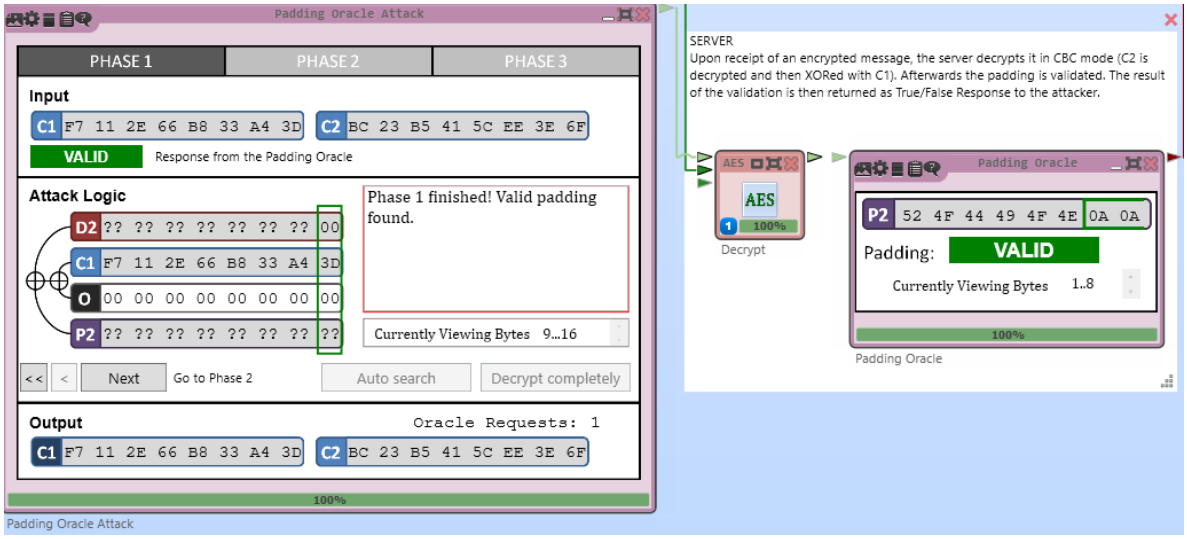
Для изучения и выполнения атаки был использован шаблон «Padding Oracle Attack on AES» приложения CrypTool 2:



Во второй 128-битный блок исходного текста был внедрен текст «RODION» (52 4F 44 49 4F 4E), после него был добавлен корректный padding в размере 10 байтов со значением 0x0A. В итоге второй блок выглядит следующим образом: «52 4F 44 49 4F 4E 0A 0A 0A 0A 0A 0A 0A 0A 0A 0A».

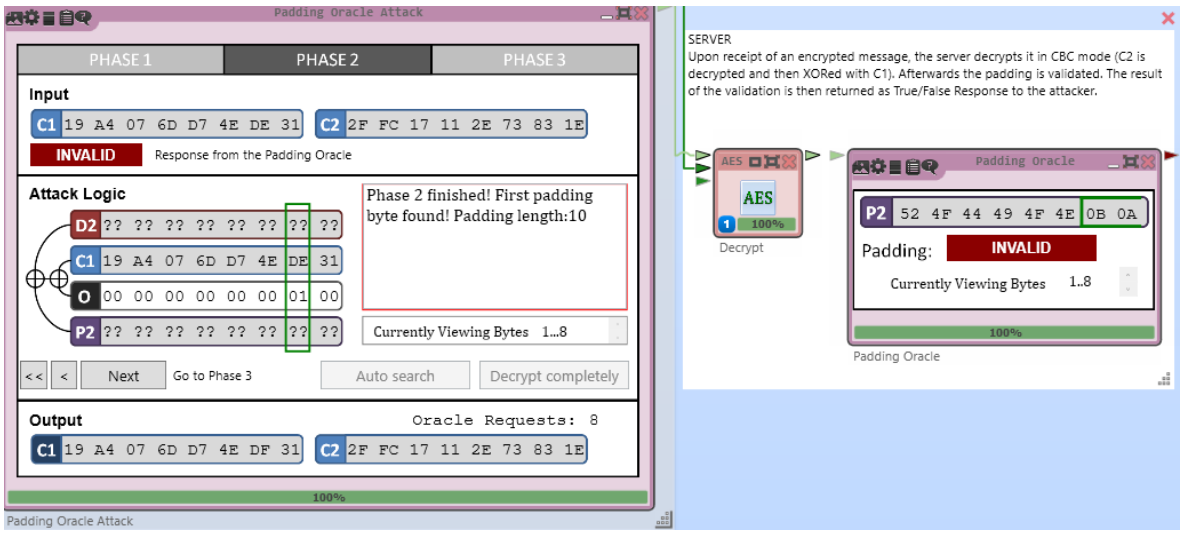


Выполним первую фазу атаки:



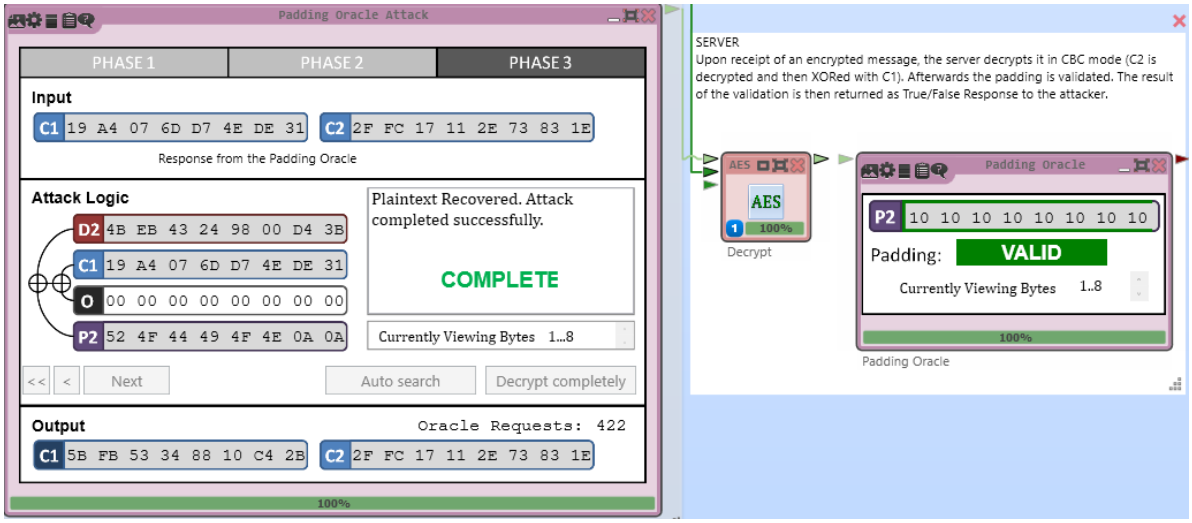
Поскольку изначально в исходном тексте установлен корректный padding, то передавая исходный шифротекст сервер сообщит о том, что padding исходного сообщения корректный.

Выполним вторую фазу:



На данном этапе мы определяем размер дополнения при помощи изменения байт последнего блока. Размер дополнения был определен корректно – 10.

Выполним третью фазу:



Зная дополнение, мы можем найти байты блока D2 по информации о корректности дополнения, перебирая значения для байтов C1. После того, как мы найдем D2, можно легко найти P2 (P2 = C1 XOR D2).

Как видно из рисунка, данные из блока P2 расшифровались корректно.

Выводы.

В ходе выполнения данной лабораторной работы был рассмотрен шифр AES, были исследованы характеристики шифра AES и финалистов конкурса AES (MARS, RC6, Serpent и Twofish), а также была изучена атака предсказанием дополнения.

1. Шифр AES и финалисты конкурса AES:
    a. При помощи демонстрационного примера была изучена работа шифра AES (Rijndael). Было определено, что AES является симметричным блочным шифром, использующим структуру «квадрат» и SP-сеть. Размер блока составляет 128 бит, размер ключа может составлять 128, 196 и 256 бит. В зависимости от размера ключа, количество раундов может составлять 10, 12 и 14 раундов соответственно. В основе выполнения операций над байтами используется поле Галуа. Каждый раунд состоит из 4 различных обратимых преобразований: слой подстановок, слой линейного перемешивания строк, слой линейного перемешивания столбцов, слой рандомизации. Для расшифрования операции производятся в обратном порядке;
    b. Было выполнено сравнение финалистов конкурса AES, а именно шифров AES, MARS, RC6, Serpent и Twofish, по значениям энтропии текста и времени проведения атаки «грубой» силы при различном количестве известных байт ключа. Значения энтропии для рассматриваемых шифров примерно равны между собой (AES – 6.41, MARS – 6.46, RC6 – 6.46, Serpent – 6.27, Twofish – 6.37). Рассматриваемые шифры показали значения времени проведения атаки «грубой силы» схожих порядков, наиболее криптостойким к атаке «грубой силы» оказался шифр Serpent, шифры AES и RC6 показали почти одинаковые результаты, при этом они показали наименьшее время атаки, между ними в

порядке увеличения времени проведения атаки идут шифры MARS и Twofish.

2. Атака «грубой силы» и атака предсказанием дополнения на AES:
    a. Были проведены атаки «грубой силы» при различном количестве известных байт ключа и используемых ядер процессора, используя в качестве оценочной функции энтропию и знание части открытого текста. Было определено, что использование в качестве оценочной функции знание части открытого текста ускоряет проведение атаки примерно в 1.6 раз, а увеличение количества используемых процессов нелинейно уменьшает время проведения атаки;
    b. Была изучена и проведена атака предсказанием дополнения на шифр AES. В основе атаки лежит возможность перехвата и изменения блоков шифротекста, а также получения информации о корректности дополнения в последнем блоке шифротекста. В процессе проведения атаки потребовалось совершить 422 обращения к серверу, чтобы корректно расшифровать последний блок шифротекста.

Были получены практические навыки работы с рассматриваемыми шифрами с использованием приложения CrypTool 1. Были получены практические навыки осуществления атак «грубой силы» и атаки предсказанием дополнения на шифр AES с использованием приложения CrypTool 2.