УГАТУ

## Лекция №4

# ХЕШ-ФУНКЦИИ

Дисциплина: Криптографическая защита информации
Преподаватель: Миронов Константин Валерьевич
Поток: БПС-3
Учебный год: 2020/21

# Содержание лекции

- **Функции сжатия**
  - **Общие сведения**
  - **Семейство MD/SHA**
- Криптографическая губка
- Имитовставки

# Общие сведения

## Криптографическая хеш-функция

- [Hash], дайджест или профиль сообщения [message digest], цифровой отпечаток [digital fingerprint]
- Односторонняя функция y=f(x), где x – двоичный код произвольной длины, y – двоичный код строго заданной длины
- Должен обеспечиваться лавинный эффект - при незначительном изменении x, y меняется радикально

```
SHA3-256("The quick brown fox jumps over the lazy dog")=
69070dda01975c8c120c3aada1b282394e7f032fa9cf32f4cb2259a0897dfc04
SHA3-256("The quick brown fox jumps over the lazy dog.")=
a80f839cd4f83f6c3dafc87feae470045e4eb0d366397d5c6ce34ba1739f734d
```

# Общие сведения

## Криптографическая хеш-функция

- **«Сильная» хэш-функция** - вычислительно невозможно подобрать два аргумента, дающих одно и то же значение
- **«Слабая» хэш-функция** – для любого заданного аргумента вычислительно невозможно подобрать другой, дающий то же значение
- **Хэш-функция с ключом (имитовставка, код аутентификации сообщения, Message Authentication Code, MAC)** – чтобы вычислить значение, нужно знать не только аргумент, но и дополнительную информацию – ключ

# Общие сведения

## Криптографическая хеш-функция

- Под взломом хеш-функции подразумевается нахождение коллизий
- Согласно парадоксу о днях рождения, если длина идеальной хеш-функции n и количество заданных пар аргумент-значение равно 2^($n$/2), то вероятность наличия двух одинаковых значений равно 50%
- Безопасная длина хеш-функции начинается примерно от 160 бит

- **«Случайный оракул»** - идеальная хеш-функция
  - Таблица, содержащая пары аргумент-значения
  - При получении аргумента, система ищет его в таблице
  - Если он есть – выдается соответствующее значение
  - Если нет – оно генерируется случайным образом
  - Таблица должна быть единой для всех пользователей
  - Ни один из пользователей не имеет доступа к таблице

# Общие сведения

## Функция сжатия

Функция Меркла-Дамгарда

- Сообщение разбивается на блоки фиксированной длины $M_1 \dots M_n$
- Последний блок при необходимости дополняется
- Над первым блоком выполняется операция:

$$H_1 = f(M_1, IV)$$

- Над последующими:

$$H_i = f(M_i, H_{i-1})$$

- Значением хеш-функции является $H_n$
- В отличие от шифрования, при хешировании синхропосылка фиксированная

# Общие сведения

## Функция сжатия

Особенности:

- Итеративное вычисление легче реализовать
- При обработке большого потока данных хеш-функцию можно вычислять на лету
- Потенциальная уязвимость:

  hash(IV, text_1||text_2) = hash( hash(text_1), text_2)
- Защита: вместо h = hash(OT) вычисляется h = hash ( hash(OT) )

# Линейка MD/SHA

**[Message Digest]** – хеш-функции от Рональда Райвеста

- **MD2** (1989) – взломана и является устаревшей
- **MD4** (1990) – обнаружены уязвимости
- **MD5** (1991) – исправленная версия MD4, теоретически взломана, но все еще применяется
- **MD6** (2008) – на самостоятельное изучение

**[Secure Hash Algorithm]** – национальные стандарты в США

- **SHA-1** (1995) – разработана АНБ на основе MD4, взломана в 2014-2017
- **SHA-2** (2002) – расширение SHA-1 на другие длины
- **SHA-3/Keccak** (2012/2007) – выбрана на основе конкурса SHA-3

# Линейка MD/SHA

**MD4, MD5, SHA-1, SHA-2** основаны на одинаковых принципах и различаются особенностями и длиной

| | Длина хеш-функции | Длина блока | Взломана |
|---|---|---|---|
| MD4 | 128 бит | 512 бит | 1991-96 |
| MD5 | 128 бит | 512 бит | 2004-06 |
| SHA-1 | 160 бит | 512 бит | 2014-17 |
| SHA2-256 | 256 бит | 512 бит | ??? |
| SHA2-512 | 512 бит | 1024 бит | ??? |

# SHA256

- SHA-2 - по сути семейство хэш-функций, к которому относится и SHA-1
- Наиболее популярна SHA-256, т. е. 256-битная
- Дополнение последнего блока
  - Если до конца блока осталось <66 бит, создается еще один блок
  - К сообщению дописывается единица
  - В последние 64 бита последнего блока записывается число бит в исходном сообщении
  - Промежуток заполняется нулями
- 512-битный блок разбивается на 16 32-битных слов
- Они расширяются до 80 32-битных слов
- Каждое следующее слово определяется по формуле:

$$W(i) = XOR(W(i-3), W(i-8), W(i-14), W(i-16)) <<< 1$$

УГАТУ
Уфимский государственный авиационный технический университет

# SHA256

- 256-битный IV разбивается на 8 32-битных слов {a,b,c,d,e,f,g,h}
- Каждое слово IV заполняется первыми 32 битами от дробной части квадратного корня одного из первых 8 простых чисел
- После обработки всех блоков из этих слов составляется хеш-функция
- Вычисление функции сжатия от одного блока состоит из 64 итераций
- На каждой *i*-й итерации выполняются следующие преобразования:

a(i) = e(i)⊟d(i-1)) ⊞MA(a(i-1), b(i-1), c(i-1)); // MA() – мажоритарная функция, i – номер итерации

b(i) = a(i-1);  c(i) = b(i-1);  d(i) = c(i-1);

e(i) = h(i-1)⊞W(t)⊞K(t)⊞( e(i-1)&f(i-1) OR !e(i-1)&g(i-1) ) ⊞d(i-1) ⊞XOR(e(i-1)>>>6, e(i-1)>>>11, e(i-1)>>>25);

f(i)=e(i-1); h(i)=f(i-1);

*мажоритарная функция – логическая функция, принимающая то же значение, что и большинство ее аргументов

# Содержание лекции

- Функции сжатия
- **Криптографическая губка**
  - **Общие сведения**
  - **SHA-3 (Keccak)**
- Имитовставки

# Общие сведения

## Криптографическая губка

Задана функция f(A) – псевдослучайное преобразование строки A состоящей из двух фрагментов R и C, длиной a=r+c

r – битовая скорость; c – битовая мощность

**шаг 1**. Хешируемый текст дополняется до целого числа блоков длиной r. Количество блоков обозначим как n, сами блоки как M1…Mn

**шаг 2**. Массив A заполняется нулями.

**шаг 3**. Заполннение губки [absorbing]. Для i=1:n

**шаг 3.1** R=xor(R,Mi)

**шаг 3.2** A=f(A)

**шаг 4**. Выжимание губки [squeezing]. Для i=1:m

**шаг 4.1** A=f(A)

**шаг 4.2** H(i)=R

**Значением хеш-функции является H(1)…H(m)**

**Условие криптостойкости:** мощность должна быть хотя бы вдвое больше, чем длина хеш-функции

# SHA-3 (Keccak)

Конкурс SHA-3 (2007-2012) завершился победой алгоритма Keccak

- Версии функции часто обозначают Keccak-256, Keccak-512 и т.д., потому что “SHA” ассоциируется с SHA-2
- A - массив 5x5 64-битных слов; изначально заполняется нулями
- r и c определяются требуемой длиной хеша и необходимым условием криптостойкости
- Для небольших длин хеш-функций отжатие можно не выполнять, достаточно взять нужное число бит из начала A после заполнения
- Применяемые операции считаются стойкими к анализу побочных излучений шифратора
- Порядок дополнения последнего блока:

**если** дополнить нужно 1 байт
**то** это байт 0x81
**иначе**
**шаг 1**. дописывается байт, состоящий из единиц.
**шаг 2**. в конец блока дописывается байт 0x80.
**шаг 3**. пространство между ними заполняется нулями

# SHA-3 (Keccak)

Преобразование f(A) – 24 раунда

На каждом выполняются операции:

\\ C(5x1), D(5x1) и B(5x5) – массивы переменных

\\ r(5x5) и RC(24x1) – массивы констант

\\ k – номер раунда

**шаг 1**. Для i=0…4 выполнить C[i] = xor(A[i,0], … , A[i,4])

**шаг 2**. Для i=0…4 выполнить D[i] = C[i-1] xor (C[i+1]>>>1)

**шаг 3**. Для i=0…4 для j=0…4 выполнить A[i,j] = A[i,j] xor D[i]

**шаг 4**. Для i=0…4 для j=0…4 выполнить B[j,2i+3j] = A[i,j] >>> r[i,j]

**шаг 5**. Для i=0…4 для j=0…4 выполнить A[i,j] = B[i,j] xor (~B[i+1,j] and B[i+2,j])

**шаг 6.** A[0,0] = A[0,0] xor RC[k-1]

| | x = 3 | x = 4 | x = 0 | x = 1 | x = 2 |
|---|---|---|---|---|---|
| y = 2 | 25 | 39 | 3 | 10 | 43 |
| y = 1 | 55 | 20 | 36 | 44 | 6 |
| y = 0 | 28 | 27 | 0 | 1 | 62 |
| y = 4 | 56 | 14 | 18 | 2 | 61 |
| y = 3 | 21 | 8 | 41 | 45 | 15 |

Значения r[x][y]

| | | | |
|---|---|---|---|
| RC[ 0] | 0x0000000000000001 | RC[12] | 0x000000008000808B |
| RC[ 1] | 0x0000000000008082 | RC[13] | 0x800000000000008B |
| RC[ 2] | 0x800000000000808A | RC[14] | 0x8000000000008089 |
| RC[ 3] | 0x8000000080008000 | RC[15] | 0x8000000000008003 |
| RC[ 4] | 0x000000000000808B | RC[16] | 0x8000000000008002 |
| RC[ 5] | 0x0000000080000001 | RC[17] | 0x8000000000000080 |
| RC[ 6] | 0x8000000080008081 | RC[18] | 0x000000000000800A |
| RC[ 7] | 0x8000000000008009 | RC[19] | 0x800000008000000A |
| RC[ 8] | 0x000000000000008A | RC[20] | 0x8000000080008081 |
| RC[ 9] | 0x0000000000000088 | RC[21] | 0x8000000000008080 |
| RC[10] | 0x0000000080008009 | RC[22] | 0x0000000080000001 |
| RC[11] | 0x000000008000000A | RC[23] | 0x8000000080008008 |

# Содержание лекции

- Функции сжатия
- Криптографическая губка
- **Имитовставки**
  - **Имитовставки на основе блочных симметричных шифров**
  - **Имитовставка на основе бесключевых хеш-функций**
  - **Особенности применения**

# Общие сведения

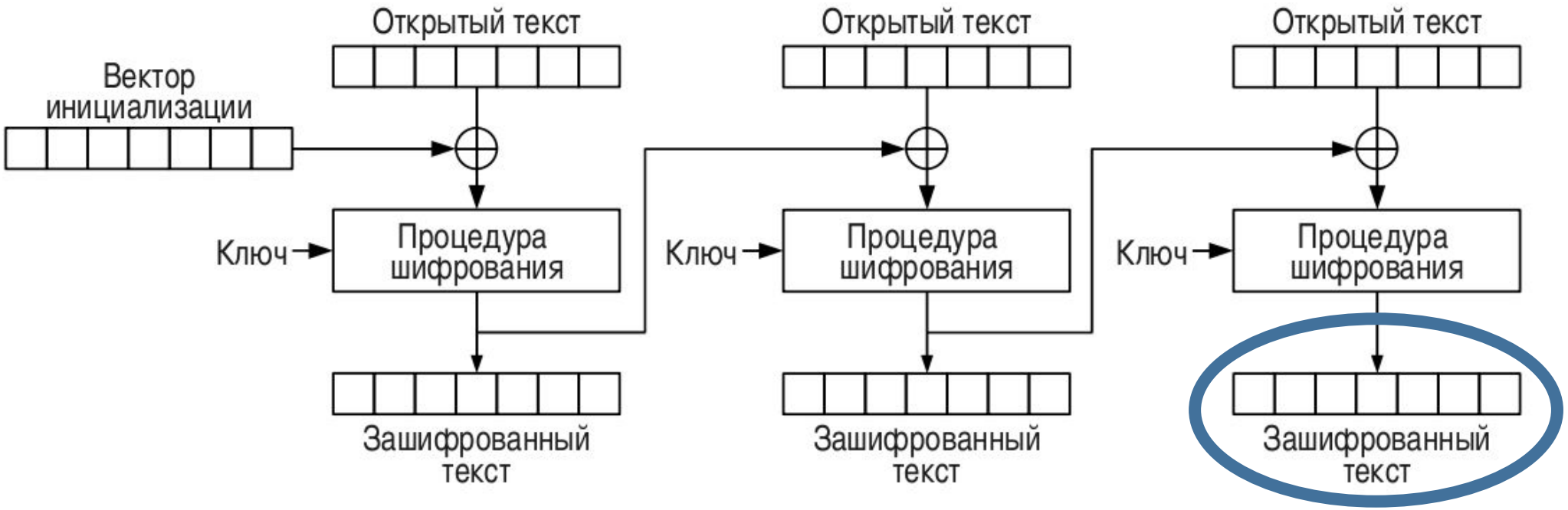
## Имитовставки

- Имитовставка – хеш-функция, для вычисления которой необходимо знание секретного элемента – ключа
- Требование устойчивости к коллизиям на имитовставку не распространяется
- Имитовставка позволяет провести **аутентификацию данных**, т.е. убедиться, что:
  - Сообщение отправлено конкретным пользователем
  - Сообщение отправлено именно в том виде, в котором пришло
- Простой и безопасный способ построения имитовставки – вычислить хеш-функцию, а потом зашифровать ее на ключе
  - С точки зрения реализации это сложный способ – нужно реализовать и операцию хеширования, и операцию шифрования
  - Алгоритмы реализуют как правило что-то одно

# Имитовставки на основе шифров

CBC-MAC: Имитовставкой является последний блок ШТ при шифровании в режиме CBC:

$$ШТ_1 = Ш(ОТ_1 \oplus IV, K)$$
$$ШТ_i = Ш(ОТ_i \oplus ШТ_{i-1}, K)$$
$$MAC = ШТ_n$$



# Имитовставки на основе шифров

CBC-MAC:

- Если размер блока больше, чем нужная длина MAC, можно использовать часть блока
- Единая операция для шифрования и аутентификации позволяет сэкономить программный код или аппаратные ресурсы
- Боб может генерировать сообщения с таким же MAC, как у присланного Алисой, подставляя нужные значения при расшифровке от последнего блока к первому
- Если есть 2 сообщения A[1]..A[n] и B[1]..B[m] и CBC-MAC(A[1]..A[n])=T то CBC-MAC( xor(T,B[1]) || B[2]..B[M] ) = CBC-MAC( A[1]..A[n] || B[1]B[m] )
  - В первый блок сообщения записывается его длина и/или порядковый номер
- Если Ева может подменить IV, то она может изменить первый блок без изменения CBC-MAC
  - Значение IV в стандарте CBC-MAC должно быть =0
  - В первый блок сообщения записывается его длина

# Имитовставки на основе шифров

C-MAC - Модификация CBC-MAC

- Последний блок шифруется другим ключом, генерируемым на основе данных и исходного ключа в зависимости от конкретного протокола
- В качестве ХФ берется не весь последний блок шифротекста, а только некоторое количество левых бит

Помимо режима CBC можно аналогичным образом использовать режим CFB

- Пример – имитовставка ГОСТ28147-89

# Имитовставки на основе хеш-функций

H-MAC:

HMAC(M)=Hash( K xor O || Hash(K xor I || M) )

- O, I и K – имеют ту же длину, что и хеш-функция
- O и I – константы,  в стандарте каждый их байт =0x5c и =0x36 соответственно
- Если исходный ключ больше, чем K, то K вычисляется как хэш-функция от него
- Если исходный ключ меньше, чем K, то он дополняется нулями

# Имитовставки

## Особенности применения (задаются конкретным протоколом)

- Имитовставка по возможности должна включать порядковый номер и направление передачи сообщения (от Алисы к Бобу, или от Боба к Алисе)
- Имитовставка должна аутентифицировать не только содержание сообщения, но и его смысл
  - Не «20 80 753», а «температура 20 влажность 80 давление 753»
  - Принцип введен, чтобы избежать ошибок при переменной длине полей
- Часто один и тот же текст нужно и шифровать, и аутентифицировать:
  - Можно добавить имитовставку, затем все вместе зашифровать
  - Можно зашифровать текст, затем вычислить имитовставку от ШТ
    - Если имитовставка не верна, можно не расшифровывать (актуально при DoS-атаках)
    - Злоумышленник видит пары сообщение-имитовставка
  - Ключи шифрования и аутентификации должны быть различны
  - Можно применить специальный режим шифрования с аутентификацией
    - Такие режимы часто запатентованы, либо не получили широкого применения

# Темы докладов

- **Хеш-функция MD6**
- **Хеш-функция Blake**
- **Хеш-функция Luffa**
- **Имитовставка U-MAC**
- **Режим шифрования OCB**