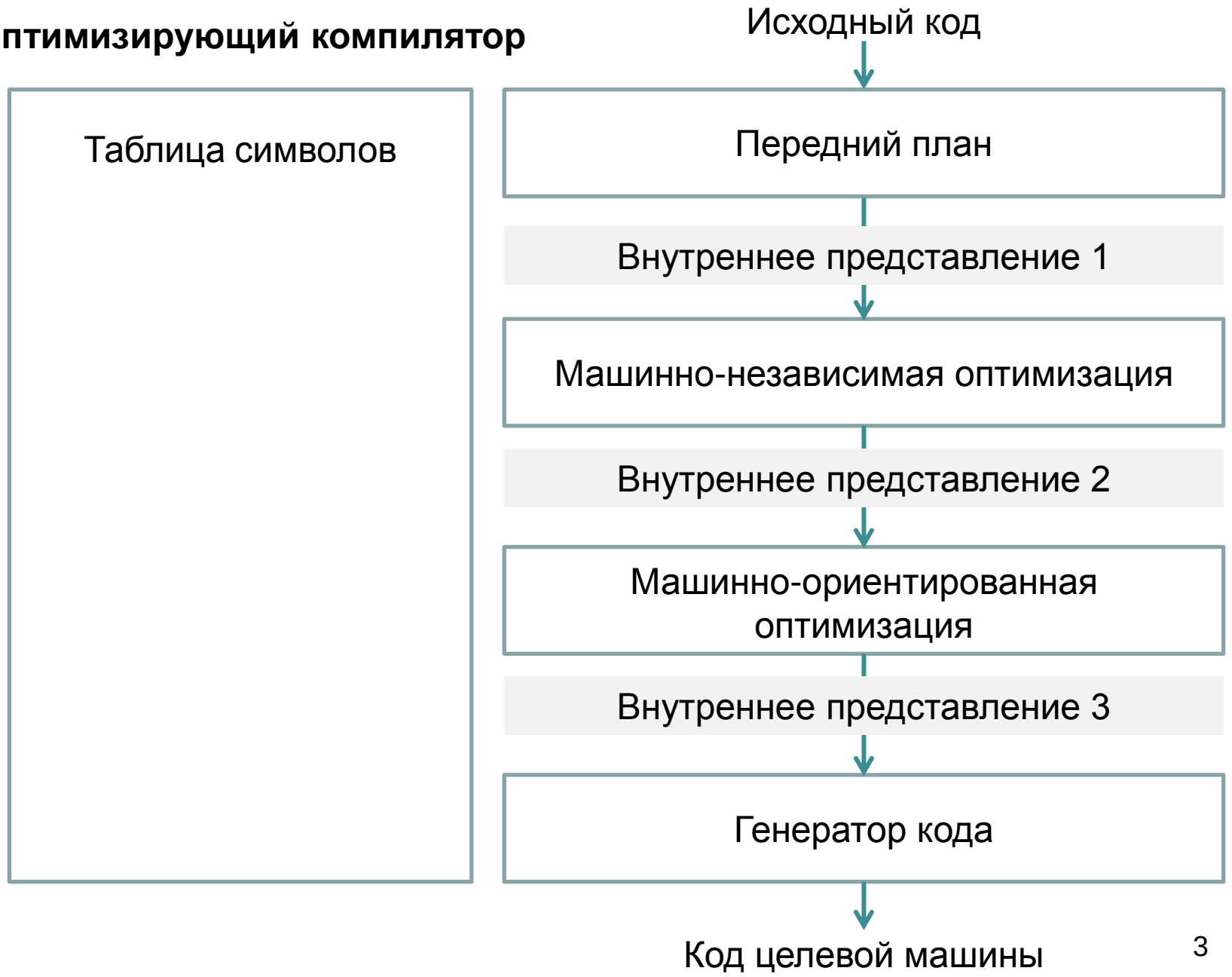
1. Введение. Неоптимизирующий компилятор

1.1 Компиляторы

1.1.1. Неоптимизирующий компилятор

Структура неоптимизирующего компилятора

1.1.2. Оптимизирующий компилятор



1.2 Цель курса

Цель курса – изучение методов оптимизации программ (как машинно-независимой, так и машинно-ориентированной и принципов конструирования оптимизирующих компиляторов.

Основное учебное пособие:
А. В. Ахо, М. С. Лам, Р. Сети, Дж. Д. Ульман. Компиляторы: принципы, технологии и инструменты, 2-е издание. М.: «И.Д. Вильямс», 2008
(в конце 2014 года был выпущен дополнительный тираж)

В тех случаях, когда излагаемый материал в указанном учебном пособии отсутствует, используется еще два учебных пособия:

Keith D. Cooper, Linda Torczon. Engineering a Compiler (Second Edition)
Elsevier, Inc. 2012

Steven S. Muchnick. Advanced Compiler Design and Implementation
Morgan Kaufmann Publishers1997

1.3 Генерация внутреннего представления

`current_pos=initial_pos+16*step` — Строка исходной программы

Анализатор лексики

⟨id,1⟩⟨=⟩⟨id,2⟩⟨+⟩⟨nm,3⟩⟨*⟩⟨id,4⟩ — Последовательность токенов

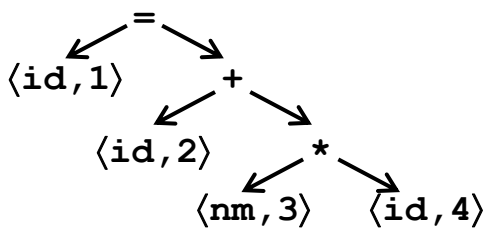
Анализатор синтаксиса

Таблица символов

Дерево разбора — Дерево разбора

Внутрен-нее имя	Внешнее имя	Атрибуты
id1	current_pos	int
id2	initial_pos	int
nm3	16	int
id4	step	int

Анализатор семантики



Абстрактное синтаксическое дерево (АСД – Внутреннее представление 1)

Генератор внутреннего представления

```
t1  ← *,nm3,id4
t2  ← +,id2,t1
id1 ← t2
```

Внутреннее представление 2

1.4. Внутреннее представление

1.4.1. Определение внутреннего представления 2

◊ Инструкции присваивания	(**x**, **y** и **z** – имена (адреса) переменных или константы):
x ← op, y, z	выполнить бинарную операцию **op** над операндами **y** и **z** и поместить результат в **x**
x ← op, y	выполнить унарную операцию **op** над операндом **y** и поместить результат в **x**
x ← y	скопировать значение переменной **y** в переменную **x**
x[i] ← y	поместить значение **y** в **i**-ю по отношению к **x** ячейку памяти
x ← y[i]	поместить значение **i**-ой по отношению к **y** ячейки памяти в **x**

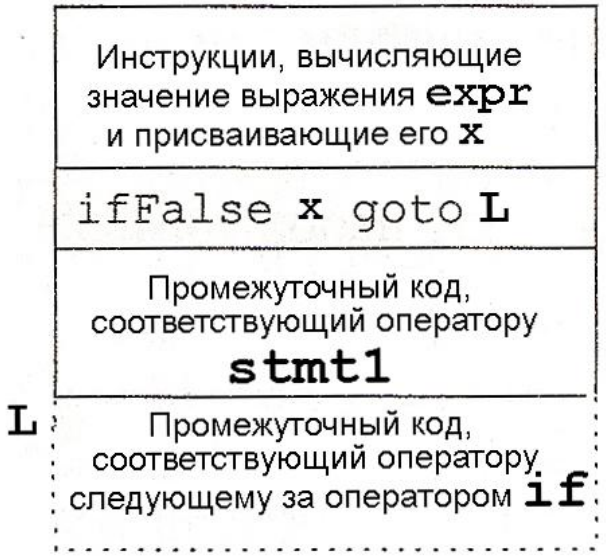
1.4. Внутреннее представление

1.4.1. Определение внутреннего представления 2

◊ Инструкции перехода:	
`goto L`	Безусловный переход: следующей будет выполнена инструкция с меткой L
`ifTrue x goto L`	Условный переход: если x истинно, следующей будет выполнена инструкция с меткой L
`ifFalse x goto L`	Условный переход: если x ложно, следующей будет выполнена инструкция с меткой L

На рисунке справа – схема трансляции оператора

```
if (expr) then stmt1;
```



1.4. Внутреннее представление

1.4.1. Определение внутреннего представления 2

◊ Процедуры:	
`param x`	Передача фактического параметра вызываемой процедуре (если вызываемая процедура имеет n параметров, то инструкции ее вызова предшествует n инструкций $param$
`call p, n`	Вызов процедуры p, имеющей n параметров
`return y`	Возврат из процедуры y – необязательное возвращаемое значение

Замечание. Это внутреннее представление – учебное и не содержит некоторых деталей, важных для реализации. Соответствующее внутреннее представление2 системы GCC называется $Gimple$.

Для выполнения задания будет использоваться внутреннее представление (биткод) IR системы $LLVM$, которое является внутренним представлением3. Описание – на сайте **…**, полное описание – на сайте **…**

1.4. Внутреннее представление

1.4.2. Пример

```
{
int i, j;
int v, x;
if (n <= m) return;
/* Начало фрагмента */
i = m - 1;
j = n;
v = a[n];
while (1) {
do i = i + 1;
while (a[i] < v);
do j = j - 1;
while (a[j] > v);
if (i >= j) break;
/* Обмен a[i], a[j] */
x = a[i];
a[i] = a[j];
a[j] = x;
}
/* Обмен a[i], a[n] */
x = a[i];
a[i] = a[n];
a[n] = x;
/* Конец фрагмента */
quicksort(a,m,j); quicksort(a,i+1,n);
}
```

```
(1)        i ← -, m, 1
(2)        j ← n
(3)        t1 ← *, 4, n
(4)        v ← a[t1]
(5)   L1:  i ← +, i, 1
(6)        t2 ← *, 4, i
(7)        t3 ← a[t2]
(8)        ifTrue t3<v
                goto L1
(9)   L2:  j ← -, j, 1
(10)       t4 ← *, 4, j
(11)       t5 ← a[t4]
(12)       ifTrue t5>v
                goto L2
(13)       ifTrue i>=j
                goto L3
(14)       t6 ← *, 4, i
(15)       x ← a[t6]
(16)       t7 ← *, 4, i
(17)       t8 ← *, 4, j
(18)       t9 ← a[t8]
(19)       a[t7] ← t9
(20)       t10 ← *, 4, j
(21)       a[t10] ← x
(22)       goto L1
(23)  L3:  t11 ← *, 4, i
(24)       x ← a[t11]
(25)       t12 ← *, 4, i
(26)       t13 ← *, 4, n
(27)       t14 ← a[t13]
(28)       a[t12] ← t14
(29)       t15 ← *, 4, n
(30)       a[t15] ← x
```

1.5. Граф потока управления

1.5.1. Базовый блок (определение)

◊ *Базовым блоком* (или *линейным участком*) называется последовательность следующих друг за другом трехадресных команд, обладающая следующими свойствами:

(1) поток управления может входить в базовый блок только через его первую инструкцию, т.е. в программе нет переходов в средину базового блока;

(2) поток управления покидает базовый блок без останова или ветвления, за исключением, возможно, в последней инструкции базового блока.

◊ Пример базового блока – инструкции (14) – (22) из примера 1.4.2

```
(14) t6 ← *, 4, i
(15) x ← a[t6]
(16) t7 ← *, 4, i
(17) t8 ← *, 4, j
(18) t9 ← a[t8]
(19) a[t7] ← t9
(20) t10 ← *, 4, j
(21) a[t10] ← x
(22) goto L1
```

1.5. Граф потока управления

1.5.4. Алгоритм построения графа потока управления (ГПУ)

◊ **Вход**: последовательность трехадресных инструкций.

◊ **Выход**: список базовых блоков для данной последовательности инструкций, такой что каждая инструкция принадлежит только одному базовому блоку.

◊ **Метод**:

- Строится упорядоченное множество НББ
- Каждому НББ соответствует ББ, который определяется как последовательность инструкций, содержащая само НББ и все инструкции до следующего НББ (не включая его) или до конца программы.
- Строится множество дуг графа потока управления:
  - если последняя инструкция ББ не является инструкцией перехода, строится дуга, соединяющая ББ со следующим ББ;
  - если последняя инструкция ББ является инструкцией безусловного перехода, строится дуга, соединяющая ББ с ББ, НББ которого имеет соответствующую метку;
  - если последняя инструкция ББ является инструкцией условного перехода, строятся обе дуги.

1.5. Граф потока управления

1.5.5. Пример

◊ Применим алгоритм 1.5.4 для построения графа потока программы из примера 1.4.2

```
(1)        i ← -, m, 1          НББ   (16)       t7 ← *, 4, i
(2)        j ← n                      (17)       t8 ← *, 4, j
(3)        tl ← *, 4, n               (18)       t9 ← a[t8]
(4)        v ← a[tl]                  (19)       a[t7] ← t9
(5)   L1:  i ← +, i, 1          НББ   (20)       t10 ← *, 4, j
(6)        t2 ← *, 4, i               (21)       a[t10] ← x
(7)        t3 ← a[t2]                 (22)       goto L1
(8)        ifTrue t3<v goto L1        (23)  L3:  t11 ← *, 4, i        НББ
(9)   L2:  j ← -, j, 1          НББ   (24)       x ←a[t11]
(10)       t4 ← *, 4, j               (25)       t12 ← *, 4, i
(11)       t5 ← a[t4]                 (26)       t13 ← *, 4, n
(12)       ifTrue t5>v goto L2        (27)       t14 ← a[t13]
(13)       ifTrue i>=j goto L3 НББ    (28)       a[t12] ← tl4
(14)       t6 ← *, 4, j         НББ   (29)       t15 ← *, 4, n
(15)       x ← a[t6]                  (30)       a[t15] ← x
```

1.5. Граф потока управления

1.5.5. Пример

◊ НББ позволяют построить следующие ББ:

Блок A

```
(1)    i ← -, m, 1
(2)    j ← n
(3)    tl ← *, 4, n
(4)    v ← a[tl]
```

Блок B

```
(5) L1: i ← +, i, 1
(6)     t2 ← *, 4, i
(7)     t3 ← a[t2]
(8)     ifTrue t3<v goto L1
```

Блок D

```
(13)    ifTrue i>=j goto L3
```

Блок E

```
(14)    t6 ← *, 4, i
(15)    x ← a[t6]
(16)    t7 ← *, 4, i
(17)    t8 ← *, 4, j
(18)    t9 ← a[t8]
(19)    a[t7] ← t9
(20)    t10← *, 4, j
(21)    a[t10] ← x
(22)    goto L1
```

Блок F

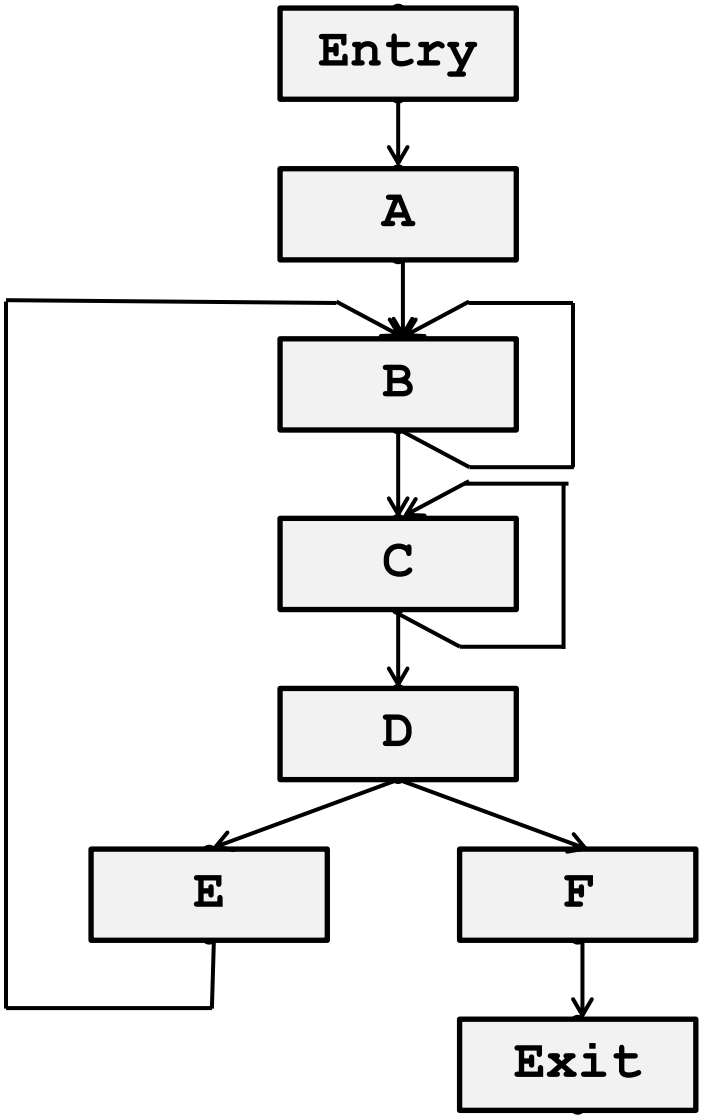
```
(23) L3:t11 ← *, 4, i
(24) x ← a[t11]
(25) t12 ← *, 4, i
(26) t13 ← *, 4, n
(27) t14 ← a[t13]
(28) a[t12] ← tl4
(29) t15 ← *, 4, n
(30) a[t15] ← x
```

Блок C

```
(9)   L2: j ← -, j, 1
(10)      t4 ← *, 4, j
(11)      t5 ← a[t4]
(12)      ifTrue t5>v goto L2
```

1.5. Граф потока управления

1.5.5. Пример. Построив дуги согласно алгоритму, получим следующий ГПУ. Для удобства анализа к ГПУ добавлены два дополнительных узла: *entry* (вход) и *exit* (выход).



1.6 Локальная оптимизация (*оптимизация базовых блоков*)

1.6.1 Постановка задачи локальной оптимизации

◊ Оптимизация – это выполнение следующих преобразований:

- Удаление *общих подвыражений* (инструкций, повторно вычисляющих уже вычисленные значения).
- Удаление *мертвого кода* (инструкций, вычисляющих значения, которые впоследствии не используются).
- *Сворачивание констант*.
- Изменение порядка инструкций, там, где это возможно, чтобы сократить время хранения временного значения на регистре.

1.6.2 Представление базового блока в виде ориентированного ациклического графа

◊ Все указанные преобразования можно выполнить за один просмотр ББ если представить его в виде ориентированного ациклического графа (ОАГ).

1.6 Локальная оптимизация

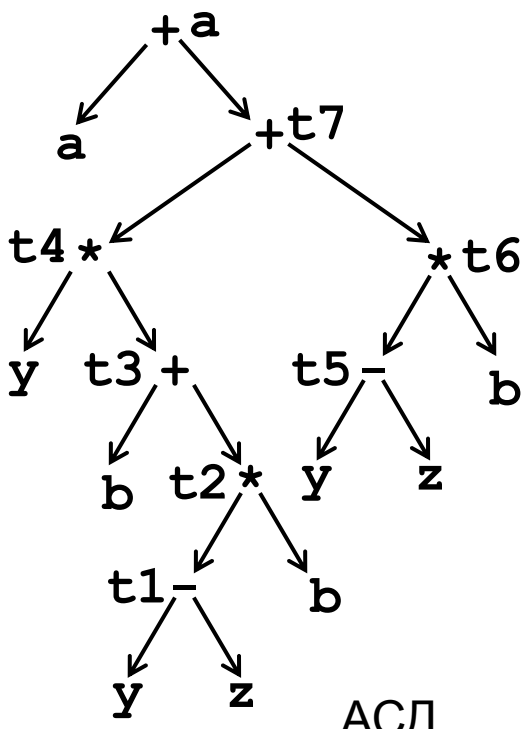
1.6.2 Представление базового блока в виде ориентированного ациклического графа

◊ **Пример**. Выражение в исходном коде:

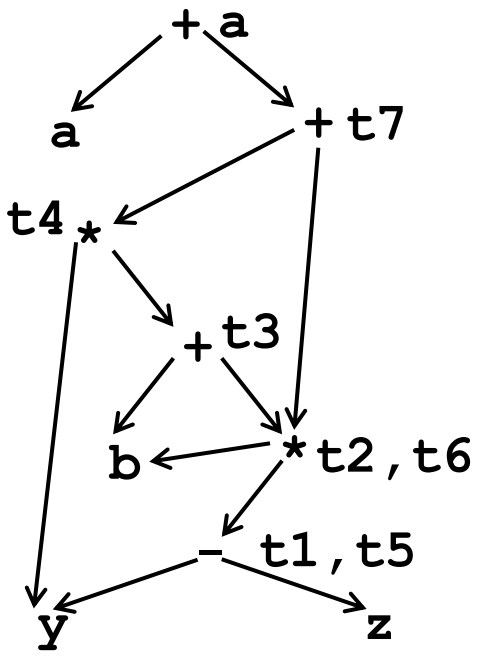
```
a = a + y*(b +(y-z)*b)+(y-z)* b
```

```
t1 ← -, y, z
t2 ← *, t1, b
t3 ← +, b, t2
t4 ← *, y, t3
t5 ← -, y, z
t6 ← *, t5, b
t7 ← +, t4, t6
a  ← +, a, t7
```

Выражение в промежуточном представлении



АСД



ОАГ

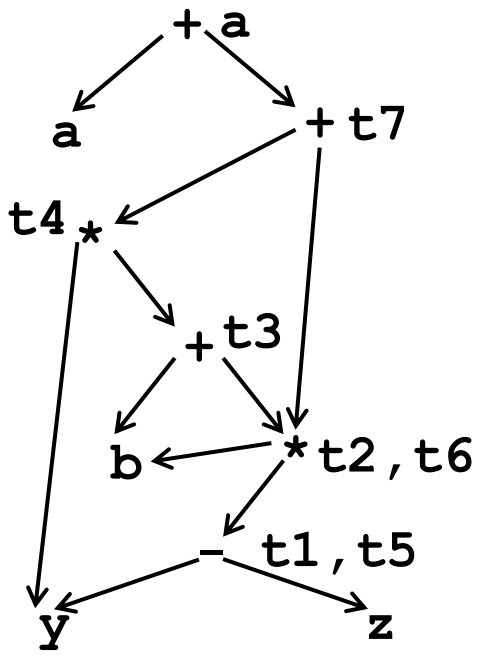
1.6.2 Представление базового блока в виде ориентированного ациклического графа

◊ **Пример (окончание).**

На ОАГ для выражения видно (в отличие от АСД):

- переменная **b** используется в двух вычислениях
- выражение **y-z** можно вычислить только один раз
- выражение **(y-z)* b** можно вычислить только один раз

```
t1 ← -, y, z
t2 ← *, t1, b
t3 ← +, b, t2
t4 ← *, y, t3
t5 ← -, y, z
t6 ← *, t5, b
t7 ← +, t4, t6
a  ← +, a, t7
```



ОАГ

1.6 Локальная оптимизация

1.6.3 Представление *ОАГ* в виде таблицы значений

- ◊ Каждая строка таблицы значений представляет один узел ОАГ.
- ◊ Первое поле каждой записи представляет собой код операции
- ◊ Каждой правой части операции

  ⟨**op, left, right**⟩,

  где **op** – код операции, а **left** и **right** – левый и правый операнды, соответствует ее *сигнатура*

  ⟨**op, #left, #right**⟩,

  где **op** – код операции, а **#left** и **#right** – номера значений левого и правого операндов (у унарных операций **#right** равен 0).
- ◊ Унарные операции **id** и **nm** определяют соответственно имена переменных и константы (листовые узлы).
- ◊ Номер значения – это номер строки таблицы значений (ТЗ), в которой определяется это значение

1.6 Локальная оптимизация

Алгоритм (на псевдокоде) построения ОАГ для базового блока B, содержащего n инструкций вида $t_i \leftarrow Op_i, l_i, r_i$.
Функция **#val(s)** определяет номер значения, определяемого сигнатурой **s = (Op, #val(l), #val(r))** .

```
for each "t_i ← Op_i, l_i, r_i" do
    s_i = (Op_i, #val(l_i), #val(r_i))
    if(ТЗ содержит s_j == s_i)
        then
              вернуть j в качестве значения #val(s_i)
        else
              завести в ТЗ новую строку ТЗ_k
              записать сигнатуру s_i в строку ТЗ_k
              вернуть k в качестве значения #val(s_i)
```

1.6 Локальная оптимизация

1.6.3 Представление *ОАГ* в виде таблицы значений

◊ Таблица значений рассматриваемого примера имеет вид:

$t1^5 \leftarrow -, y^3, z^4$
$t2^6 \leftarrow *, t1^5, b^2$
$t3^7 \leftarrow +, b^2, t2^6$
$t4^8 \leftarrow *, y^3, t3^7$
$t5^5 \leftarrow -, y^3, z^4$
$t6^6 \leftarrow *, t5^5, b^2$
$t7^9 \leftarrow +, t4^8, t6^6$
$a^{10} \leftarrow +, a^1, t7^9$

1	id	ссылка в ТС		a
2	id	ссылка в ТС		b
3	id	ссылка в ТС		y
4	id	ссылка в ТС		z
5	-	3	4	t1, t5
6	*	5	2	t2, t6
7	+	2	6	t3
8	*	3	7	t4
9	+	8	6	t7
10	+	1	9	a
# значения	КОП	# операнда	# операнда	Присоединенные переменные
	Определение значения (сигнатура)			

1.6 Локальная оптимизация

```
t1 ← -, y, z
t2 ← *, t1, b
t3 ← +, b, t2
t4 ← *, y, t3
t5 ← -, y, z
t6 ← *, t5, b
t7 ← +, t4, t6
a  ← +, a, t7
```

(a) Блок E
до оптимизации

```
t1^5 ← -, y^3, z^4
t2^6 ← *, t1^5, b^2
t3^7 ← +, b^2, t2^6
t4^8 ← *, y^3, t3^7
t5^5 ← -, y^3, z^4
t6^6 ← *, t5^5, b^2
t7^9 ← +, t4^8,t6^6
a^10 ← +, a^1, t7^9
```

(c) Блок E
после нумерации значений

```
t1 ← -, y, z
t2 ← *, t1, b
t3 ← +, b, t2
t4 ← *, y, t3
t5 ← t1
t6 ← t2
t7 ← +, t4, t6
a  ← +, a, t7
```

(c) Блок E
после оптимизации

1.6 Локальная оптимизация

1.6.6 Удаление общих подвыражений

◊ Общие подвыражения обнаруживаются при построении узлов *ОАГ* с помощью алгоритма 1.6.4 (нумерация значений).

1.6.7 Сворачивание констант

◊ *Сворачивание констант* заключается в вычислении констант в процессе компиляции и замене константных выражений их значениями. Например, выражение 2 * 3.14 можно заменить значением 6.28.

1.6.8 Снижение стоимости вычислений

◊ Еще один класс алгебраических оптимизаций включает локальное *снижение стоимости вычислений,* т.е. заменяет более дорогие с операции более дешевыми (см. таблицу)

Дорогие	Дешевые
x^2	x × x
2 × x	x + x
x/2	x × 0.5

1.6 Локальная оптимизация

1.6.9 Удаление мертвого кода

- Преобразование *ОАГ*, соответствующее удалению мертвого кода, состоит в удалении из *ОАГ* любого корня (**Op**), с которым не связаны живые переменные.
- *Живыми* называются переменные, значения которых, вычисленные в рассматриваемом базовом блоке, используются в других базовых блоках
- Для полноценного удаления мертвого кода необходимо уточнить определение базового блока.
- **Определение**. Базовым блоком называется тройка

$$B = \langle P, Input, Output \rangle,$$

где P последовательность инструкций,

$Input$ – множество переменных, определенных до входа в блок B,

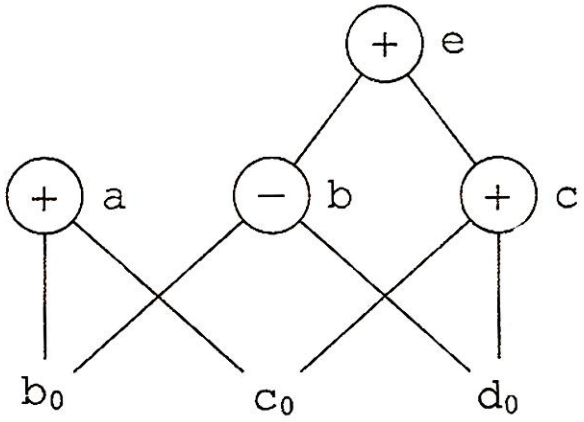
$Output$ – множество переменных, используемых после выхода из блока B.

1.6 Локальная оптимизация

1.6.9 Удаление мертвого кода

◊ **Пример**. Рассмотрим базовый блок $B = \langle P, \{a, b, c, d\}, \{a, b\}\rangle$

```
a ← +, b, c
b ← -, b, d
c ← +, c, d
e ← +, b, c
```




```
a ← b + c
b ← b - d
```

Базовый блок B до удаления мертвого кода

ОАГ базового блока B

Базовый блок B после удаления мертвого кода

1.7 Восстановление базового блока по его ОАГ

1.7.1. Правила

- ◊ Для каждого узла с одной или несколькими связанными переменными строится трехадресная инструкция, которая вычисляет значение одной из этих переменных.
- ◊ Если у узла несколько присоединенных живых переменных, то следует добавить команды копирования, которые присвоят корректное значение каждой из этих переменных.

1.7 Восстановление базового блока по его ОАГ

1.7.2. Пример

◊ Пусть ОАГ представлен следующим массивом записей.

1	b_0	ссылка в ТС		
2	c_0	ссылка в ТС		
3	d_0	ссылка в ТС		
4	+	1	2	a
5	-	4	3	d, b
6	+	5	2	c
8	a	ссылка в ТС		
9	b	ссылка в ТС		
10	c	ссылка в ТС		
11	d	ссылка в ТС		

◊ Применяя правила из п. 1.7.1, получим:

Базовый блок

$B = \langle P, Input, Output \rangle$

P:

$\mathbf{a} \leftarrow +, \mathbf{b}_0, \mathbf{c}_0$

$\mathbf{d} \leftarrow -, \mathbf{a}, \mathbf{d}_0$

$\mathbf{c} \leftarrow +, \mathbf{d}, \mathbf{c}_0$

$\mathbf{b} \leftarrow \mathbf{d}$

$Input = \{\mathbf{b}_0, \mathbf{c}_0, \mathbf{d}_0\}$

$Output = \{\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{d}\}$

1.8 Локальная оптимизация. Заключительные замечания

1.8.1. Заключительные замечания

- ◊ Стремление разработать полноценную локальную оптимизацию привело к необходимости построить связи по данным оптимизируемого базового блока с другими базовыми блоками, т.е. к необходимости глобального анализа оптимизируемой процедуры (функции, метода).
- ◊ Необходимо научиться строить базовые блоки больших размеров, чтобы повысить эффективность локальной оптимизации.
- ◊ Ссылаться на базовые блоки по их идентификаторам неудобно. Необходимо научиться нумеровать базовые блоки, чтобы их можно было называть $B1$, $B2$ и т.д. Решение этой задачи связано с обходом ГПУ.
- ◊ Далее будут рассмотрены методы решения перечисленных задач и некоторых других задач, которые будут возникать по ходу дела.