

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ
(ИММ)


УДК 629.735.33-4

№ гос. регистрации I880003467

Инв. №

02.8.90 045178

УТВЕРЖДАЮ
Зам. директора ИММ УРО АН СССР
к.ф.-м.н. *В.М. РИШЕТОВ*
" 27 " *сентября* 1988 года



ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Разработка численных методов построения экстремальных
ветровых возмущений, действующих на самолет на этапе
посадки

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИМИТАЦИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ
ВЕТРОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ
(заключительный)

Зав.отделом динамических систем
доктор физ.-мат.наук

А.И. Субботин А.И. СУББОТИН

Зав.сектором
кандидат физ.-мат.наук

В.С. Пацко

В.С. ПАЦКО

Свердловск - 1988

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Ответственные исполнители

Научный сотрудник
кандидат физ.-мат. наук 27.12.88 *Fr* Н.Д.БОТКИН (введение,
реферат, заключение,
разделы I, 2)

Младший научный сотрудник 27.12.88 *Ту* В.Л.ТУРОВА (раздел 3)

Соисполнители

Студент Уральского
госуниверситета им.А.М.Горького
27.12.88 *Ив* А.Г.ИВАНОВ (раздел 4)

РЕФЕРАТ

Отчет 51 стр., 15 рисунков, 4 источника

ПЕРСОНАЛЬНАЯ ЭВМ, ОПЕРАЦИОННАЯ СИСТЕМА, ФАЙЛ, КОМПИЛЯЦИЯ, РЕДАКТИРОВАНИЕ СВЯЗЕЙ, ЗАГРУЗОЧНЫЙ МОДУЛЬ, СДВИГ ВЕТРА, МИКРОВЗРЫВ, ЗАДАЧА ПОСАДКИ, ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ИГРА, ОПТИМАЛЬНАЯ СТРАТЕГИЯ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ.

Приводятся инструкции по работе с комплексом программ формирования экстремальных ветровых возмущений.

Цель работы - описать последовательность получения загрузочных (выполняемых) модулей программ синтеза экстремальных ветровых возмущений.

Подготовлены к передаче и записаны на дискету тексты программ синтеза экстремальных ветровых возмущений. Описаны порядок генерации загрузочных модулей, правила подготовки исходных данных, запуск программ, структура и формат выходных файлов.

Рассмотрена задача посадки самолета в условиях сдвига ветра, обусловленного микровзрывом. Приведены результаты моделирования.

Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании комплексных самолетных тренажеров, а также для контроля методов автоматической посадки.

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
В в е д е н и е	5
I. ПРОГРАММА ПОСТРОЕНИЯ ЛИНИЙ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ	7
I.1. Исходные тексты программы, компиляция и редак- тирование связей	7
I.2. Файл исходных данных	9
I.3. Начальный диалог с программой	12
I.4. Выходные файлы программы	14
2. ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОСАДКИ	17
2.1. Исходные тексты программы, компиляция и редактирование связей, библиотека <i>LIBRA. LIB</i>	17
2.2. Файл исходных данных	19
2.3. Процесс счета	22
3. ПОСТРОЕНИЕ ЛИНИЙ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ДЛЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ	23
4. ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ ПОСАДКОЙ САМОЛЕТА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ	27
4.1. Нелинейная система движения самолета	27
4.2. Модель микровзрыва	31
4.3. Линейная система	32
4.4. Вспомогательная линейная дифференциальная игра ³⁴	34
4.5. Результаты моделирования	36
З а к л ю ч е н и е	50
Список использованных источников	51

В В Е Д Е Н И Е

Работа является непосредственным продолжением отчета /I/, посвященного описанию комплекса программ синтеза экстремальных ветровых возмущений. Данный отчет включает в себя информацию об исходных текстах программ на языке *FORTRAN*, инструкции по генерации загрузочных модулей, примеры файлов исходных данных и требования к их подготовке, подробное описание структуры и формата выходных файлов программ. К отчету прилагается дискета, содержащая исходные тексты программ, примеры файлов с исходными данными, а также пример выходного файла программы моделирования процесса посадки.

Отчет состоит из четырех разделов. В первом разделе дается информация о программе построения линий переключения, определяющих синтез оптимальных стратегий в линейной дифференциальной игре. Второй раздел содержит информацию о программе моделирования процесса посадки самолета. В третьем разделе описывается порядок работы с модифицированной программой построения линий переключения, рассчитанной на случай нестационарной линейной системы. Комплекс программ реализован на языке *MICROSOFT FORTRAN* для персональной ЭВМ с операционной системой *MS - DOS*. Разработка производилась на персональной ЭВМ *IBM PC* с операционной системой *DOS 3.2*.

Раздел 4 содержит дополнительный материал, примыкающий к исследованиям, описанным в отчетах / 2, 3 /. Рассматривается задача посадки самолета в вертикальной плоскости в условиях ветрового возмущения. Нелинейные уравнения динамики самолета,

а также модель микровзрыва, задающего ветровое возмущение, заимствованы из работы / 4 /. Управление самолетом осуществляется через изменение угла атаки и изменение силы тяги. Исследуемый способ управления базируется на решении вспомогательной линейной дифференциальной игры. Приводятся результаты моделирования, соответствующие различным вариантам расположения микровзрыва.

В первых трех главах отчета используются понятия и обозначения из / I /.

Работа выполнена в соответствии с договором № I8-86-2 от 15.08.86 г. на проведение научно-исследовательской работы между Институтом математики и механики УрО АН СССР и Ордена Ленина Академией гражданской авиации.

I. ПРОГРАММА ПОСТРОЕНИЯ ЛИНИЙ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ

I.I. Исходные тексты программы, компиляция и редактирование связей

Программа построения линий переключения состоит из головной программы *LINES* и подпрограмм *GATHER*, *NORMAN*, *PPPOB*, *BOFF*, *PAZZP*, *FU*, *A*, *BYBOP1*, *DE14R*, *INTSTP*, *FOC*. Исходный текст программы находится в трех файлах прилагаемой к отчету дискеты: *LINES.FOR*, *LINSUB1.FOR*, *LINSUB2.FOR*.

Файл *LINES.FOR* содержит текст головной программы и подпрограммы *FU*. Файл *LINSUB1.FOR* содержит тексты больших подпрограмм *GATHER*, *BOFF*, *BYBOP1*. В файле *LINSUB2.FOR* находятся тексты коротких подпрограмм *NORMAN*, *PPPOB*, *PAZZP*, *A*, *DE14R*, *INTSTP*, *FOC*.

Для получения загрузочного модуля программы построения линий переключения нужно воспользоваться компилятором *FL* системы программирования *FORTRAN MICROSOFT* и редактором связей *LINK*. При компиляции следует учитывать конфигурацию персонального компьютера (наличие микропроцессора 8088 или 8086, наличие арифметического сопроцессора 8087) и в зависимости от этого использовать соответствующие опции компилятора *FL*. Опции компилятора определяют также одну из возможных моделей памяти (*Medium*,

Large , *Huge*). Поскольку программа уместается в любую из этих моделей, конкретный выбор является несущественным. При редактировании связей необходимо указать стандартную фортрановскую библиотеку, которая должна соответствовать конфигурации персонального компьютера и модели памяти, указанной в опциях компилятора *FL* .

Для персонального компьютера с микропроцессором 8088 и арифметическим сопроцессором 8087 последовательность команд генерации загрузочного модуля выглядит следующим образом

```

FL_/F_ LINES_ LINES. FOR_/C
FL_/F_ LINES_ LINSUB1. FOR_/C
FL_/F_ LINSUB2_ LINSUB2. FOR_/C
LINK_ LINES + LINSUB1 + LINSUB2 ,
LINES. EXE , NUL , LLIBFOR7. LIB

```

Если вместо сопроцессора 8087 используется эмулятор, то описанные выше команды необходимо модифицировать следующим образом

```

FL_/F_ LINES_/FP_ LINES. FOR_/C
FL_/F_ LINSUB1_/FP_ LINSUB1. FOR_/C
FL_/F_ LINSUB2_/FP_ LINSUB2. FOR_/C

```

LINK_LINES + LINSUB1 + LINSUB2 ,
LINES.EXE, NUL, LLIBFORE.LIB

При этом необходимо, чтобы в первом случае имелась в наличии библиотека *LLIBFOR7.LIB*, рассчитанная на работу с сопроцессором 8087, а во втором – библиотека *LLIBFORE.LIB*, рассчитанная на работу с эмулятором.

1.2. Файл исходных данных

Структура файла исходных данных для программы построения линий переключения описана в /1/. Прилагаемая к настоящему отчету дискета содержит два файла с исходными данными. В файле *BOK.DAN* находятся данные, соответствующие дифференциальной игре из работы /2/, описывающей боковое движение самолета. Файл исходных данных *FROD.DAN* соответствует дифференциальной игре, описывающей канал управления продольным движением самолета /2/.

Рассмотрим подробно записи файла *BOK.DAN* (рис. 1.1), используя обозначения, которые применялись в работе /1/ при описании структуры файла исходных данных.

Строка 1 указанного файла содержит целые числа n, p, q , где n – размерность фазового вектора системы, p – размерность вектора управлений, q – размерность вектора помех.

Строка 2 содержит целые числа $\alpha, \beta, \gamma, \sigma$, где α, β – номера координат фазового вектора, входящих в функцию платы, γ – количество вершин целевого множества, определяюще-

12, 2, 1
1, 2, 6, 4
0., 15., 0.05
0., 1., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0.
0., -0.07694, -5.5553, 0., 9.27186, 0., -1.4853, 0., 0., 0., 0.07699, 0.
0., 0., 0., 1.00132, 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0.
0., -0.0129, -0.9338, -0.2588, -0.0882, -0.0303, -0.2456, 0., -0.0147, 0., 0.0129, 0.
0., 0., 0., -0.05136, 0., 1., 0., 0., 0., 0., 0., 0.
0., -0.0330, -2.386, -0.9533, -0.2256, -1.459, -0.2327, 0., -0.2206, 0., 0.0330, 0.
0., 0., 0., 0., 0., 0., -4., 0., 0., 0., 0., 0.
0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0.
0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., -4., 0., 0., 0.
0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0.
0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., -0.5, 0.5
0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 0., -3.
0., 0.
0., 0.
0., 0.
0., 0.
0., 0.
0., 0.
0., 0.
4., 0.
0., 0.
0., 4.
0., 0.
0., 0.
0., 0.
0.
0.
0.
0.
0.
0.
0.
0.
0.
0.
0.
0.
0.
0.
0.
3.
.17453, .17453
10., 10.
1., 0., 1., 0.
0., -1.5, -6., 0., -6., 1.5, 0., 1.5, 6., 0., 6., -1.5
5., 3., 1., 1.2
'nil'
'\for\disk\poDEZ'
'\for\disk\poWZ'
'\for\disk\fmBOK'
'\for\disk\fhBOK'

Рис. I.I. Файл исходных данных программы построения линий переключения.

го функцию платы, σ - количество значений параметра C , используемых для построения линий переключения.

Строка 3 содержит вещественные числа t_0 , T , Δ , где t_0 , T - начальный и конечный моменты, Δ - шаг дискретной схемы.

Каждая из строк 4-15 содержит по 12 чисел и является соответствующей строкой матрицы A линейной управляемой системы. Строки 16-27 образуют матрицу B при векторе управлений. Строки 28-39 составляют матрицу C при векторе помех.

Строка 40 содержит числа μ_1 , μ_2 , определяющие ограничения на компоненты двумерного вектора управлений.

Строка 41 содержит число γ_1 , определяющее ограничение на единственную компоненту вектора помех.

Строка 42 содержит числа a_0 , a_1 , b_0 , b_1 , определяющие зависимость от времени ограничений на компоненты векторов управлений и помех.

Строка 43 содержит координаты вершин целевого множества M , определяющего функцию платы. Каждая вершина задается двумя следующими подряд координатами; вершины перечислены в порядке обхода по часовой стрелке.

В строке 44 содержатся числа C_1, \dots, C_σ , являющиеся значениями параметра "C", которые используются при построении линий переключения.

Строки 45-46 содержат строковые константы, задающие имена файлов для записи семейств линий переключения, отвечающих компонентам u_1 , u_2 вектора управлений. Отметим, что в строке 45 на рис. I.I стоит фиктивное имя файла, указывающее программе не создавать файл для компоненты u_2 вектора управлений. Об использовании фиктивных имен будет сказано ниже.

Строка 47 определяет имя файла для семейства линий переключения, отвечающего компоненте помехи.

Строка 48 определяет имя файла для семейства фундаментальных матриц.

Последняя, 49 строка содержит имя вспомогательного файла.

При создании файла исходных данных необходимо придерживаться следующих правил:

1) числа отделяются друг от друга запятыми или символами перевода строки;

2) пробелы перед числами и между ними не допускаются,

3) целые величины должны изображаться целым числом, вещественные — числом с десятичной точкой,

4) строковые константы должны быть дополнены справа пробелами так, чтобы каждая из них содержала не менее 20 символов,

5) каждой компоненте векторов управлений и помех должна соответствовать строковая константа, определяющая имя файла.

Должно быть также указано имя файла для записи семейства фундаментальных матриц и имя вспомогательного файла. Однако, если информация, записываемая в один из этих файлов не представляет интереса, то следует в качестве имени файла использовать строку, начинающуюся символами " *nil* " (прописные буквы). В этом случае соответствующий файл не будет создан.

1.3. Начальный диалог с программой

В начале сеанса работы программа запрашивает имя файла с исходными данными. Пользователь вводит имя или признак окончания сеанса работы *END* . Если пользователь ввел

имя файла, но программа не нашла файл с указанным именем, то она сообщает об этом и повторяет приглашение ввести имя файла или признак окончания сеанса работы. В случае успешного открытия файла программа считывает исходные данные и предлагает либо выбрать один из режимов работы: *NEW*, *CONT*, либо ввести признак окончания сеанса работы *END*.

Если выбран режим *CONT*, то программа полностью обновляет информацию во всех выходных файлах, имена которых указаны в массиве исходных данных. Если какие-либо из этих файлов не существуют, то они создаются заново.

Режим *CONT* позволяет насчитывать линии переключения за несколько сеансов. Пусть, например, к началу сеанса работы уже просчитаны линии переключения по набору c_1, \dots, c_6 значений параметра "С" /I, стр. II/, а в массиве исходных данных содержится набор $\hat{c}_1, \dots, \hat{c}_6$. Тогда к просчитанным точкам линий переключения добавляются точки, соответствующие значениям \hat{c}_i , не входящим в набор c_1, \dots, c_6 . Счет в режиме *CONT* начинается с вывода на экран набора старых значений c_1, \dots, c_6 , а также набора значений, составляющих множество $\{\hat{c}_1, \dots, \hat{c}_6\} \setminus \{c_1, \dots, c_6\}$. После этого предлагается либо продолжить счет, либо закончить работу. Следует отметить, что использование режима *CONT* возможно лишь тогда, когда все выходные файлы были ранее созданы в режиме *NEW*.

После выбора одного из режимов *NEW* или *CONT* программа запрашивает вспомогательный параметр — максимальное число нормалей, допустимое при построении сечений множества позиционного поглощения. Пользователь может выбрать любое число из интервала, указанного в запросе. Смысл этого пара —

метра состоит в следующем: если в процессе счета количество нормалей очередного сечения множества позиционного поглощения превысит значение параметра, то сработает программа выбрасывания близких нормалей, и их количество значительно уменьшается. Процедура выбрасывания близких нормалей существенно сокращает время счета, лишь незначительно уменьшая точность настроек.

После выбора максимально допустимого количества нормалей программа выдает сообщение о начале счета. В процессе счета на экран выводятся строки, содержащие следующую информацию: текущий момент обратного времени, номер значения параметра "С", значение параметра "С". Работа программы выбрасывания близких нормалей сопровождается выводом на экран соответствующего сообщения.

1.4. Выходные файлы программы

Каждой компоненте вектора управлений и вектора помех соответствует файл для записи линий переключения. Этот файл в программе специфицируется как файл прямого доступа бесформатного обмена с длиной записи, равной 480 байт. Файл для записи фундаментальных матриц специфицируется как файл прямого доступа бесформатного обмена с длиной записи, равной $n \times 480$ байт, где

n - размерность фазового вектора системы. Вспомогательный файл является файлом прямого доступа форматного обмена с длиной записи 80 байт (80 символов). Программа помещает в этот файл четыре записи. Записи 1, 3, 4 осуществляются по формату (15I5). Запись 2 производится по формату (15 F 6.3).

Опишем структуру информации, помещаемую в выходные файлы. При описании будем использовать обозначения из работы /1,

стр. II, I9/. Напомним, что линии переключения для i -ой компоненты вектора управлений строятся по набору значений C_1, \dots, C_σ параметра "C" и через $\alpha_m^i(t_k)$ обозначается точка линии переключения для момента t_k , соответствующая значению C_m параметра "C". Выходной файл, содержащий линии переключения, отвечающие i -ой компоненте вектора управлений, состоит из последовательности G_1, \dots, G_σ групп записей. Каждая группа записей G_m соответствует значению параметра "C" и содержит в себе $\ell_m = \text{int}((\omega_m - 1)/60) + 1$ записей (число ω_m определено в /I, стр. I9/). Первая запись группы G_m содержит координаты точек

$$\alpha_m^i(t_\omega), \alpha_m^i(t_{\omega-1}), \dots, \alpha_m^i(t_{\omega-59}),$$

где $\omega = \text{int}((T - t_0)/\Delta)$. Вторая запись содержит координаты точек

$$\alpha_m^i(t_{\omega-60}), \alpha_m^i(t_{\omega-61}), \dots, \alpha_m^i(t_{\omega-119})$$

и т.д.

Последняя запись группы G_m содержит координаты точек

$$\alpha_m^i(t_{m - (\ell_m - 1)60}), \dots, \alpha_m^i(t_{\omega - \omega_m + 1}).$$

Таким образом, каждая запись группы G_m кроме последней содержит координаты 60 точек. Следовательно, длина записи равна $2 \times 60 \times 4$ байта = 480 байт. Последняя запись в случае, когда ω_m делится нацело на 60, также содержит координаты 60 точек. В противном случае последняя запись является неполной.

Выходной файл, содержащий фундаментальные матрицы $X_{\alpha, \beta}(t_k)$, $k = 1, \dots, \omega$, состоит из $\ell = \text{int}((\omega - 1)/60) + 1$ записей. Первая запись содержит компоненты матриц

$$X_{\alpha, \beta}(t_{\omega}), \dots, X_{\alpha, \beta}(t_{\omega-59}).$$

Вторая запись - компоненты матриц

$$X_{\alpha, \beta}(t_{\omega-60}), \dots, X_{\alpha, \beta}(t_{\omega-119}),$$

и т.д.

Последняя запись содержит компоненты матриц

$$X_{\alpha, \beta}(t_{\omega-(\ell-1)60}), \dots, X_{\alpha, \beta}(t_1).$$

Каждая матрица имеет размерность $2 \times n$ и записывается в файл по столбцам. Таким образом, все записи кроме последней содержат по 60 матриц. Последняя запись может содержать менее 60 матриц. Поскольку каждый элемент матрицы занимает 4 байта, матрица содержит $2 \times n$ элементов, а запись состоит из 60 матриц, то длины записи равна $2 \times n \times 60 \times 4 = n \times 480$ байт.

2. ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОСАДКИ

2.1. Исходные тексты программы, компиляция и редактирование связей, библиотека *LIBRA.LIB*

Программа моделирования процесса посадки состоит из головной программы, имеющей имя *MODEL*, и тридцати семи подпрограмм. Исходный текст программы на языке *FORTRAN* содержится в пяти файлах прилагаемой к отчету дискеты. Файлы имеют следующие имена: *MODEL.FOR*, *DINAM.FOR*, *FLZ.FOR*, *RULI.FOR*, *WETER.FOR*. Файл *MODEL.FOR* содержит текст головной программы. В файле *DINAM.FOR* содержатся подпрограммы *DIFUR*, *LABAN*, *DEZ*, *INTSTP*, *PLATA1*, *PLATA2*. Эти подпрограммы определяют динамику нелинейной моделируемой системы, выполняют процедуру интегрирования и вычисляют показатели качества продольного и бокового каналов по окончании процесса управления. Файл *FLZ.FOR* содержит тексты подпрограмм *FUND1*, *FUND2*, *LINE1*, ..., *LINE6*, *ZNAK*, *ZNAK1*. Перечисленные программы предназначены для считывания фундаментальных матриц и линий переключения, а также для выбора знаков компонент управления и помехи. Описание этих подпрограмм и правил их использования при самостоятельной разработке программ моделирования дано в /I/. Файл *RULI.FOR* содержит тексты подпрограмм *DLP1*, *DLP2*, *DLP3*, *DBZ1*, *DBZ2*, *DBZ3*, *DEZ1*, *DEZ2*, *DEZ3*, *FDEL*, *FDBZ*, *FGZ*,

предназначенных для выбора управляющих воздействий в силу игрового, действующего и комбинированного способов управления. В файле *WETER.FOR* содержатся тексты подпрограмм *WX1*, *WY1*, *WZ1*, *WX2*, *WY2*, *WZ2*, *VV*, *STR*, *WAR*, которые формируют компоненты вектора возмущений в силу игрового способа, постоянными или как результат действия микровзрыва ветра /1,2/.

Для получения загрузочного модуля программы моделирования процесса посадки необходимо использовать компилятор *FL* системы *FORTRAN MICROSOFT* и редактор связей *LINK*. При компиляции и редактировании связей следует учитывать все сказанное в разделе I.I по поводу конфигурации персонального компьютера. Для персонального компьютера с микропроцессором 8088 и арифметическим сопроцессором 8087 последовательность команд для получения загрузочного модуля выглядит следующим образом

FL _/F_ MODEL _ MODEL.FOR _/C

FL _/F_ DINAM _ DINAM.FOR _/C

FL _/F_ FLZ _ FLZ.FOR _/C

FL _/F_ RULI _ RULI.FOR _/C

FL _/F_ WETER _ WETER.FOR _/C

*LINK _ MODEL + DINAM + FLZ + RULI +
+ WETER, MODEL.EXE, NUL,*

LLIBFOR7.LIB.

Если вместо сопроцессора 8087 используется эмулятор, то в команде *LINK* следует заменить библиотеку *LLIBFOR7* на библиотеку *LLIBFORE*, а в каждую из команд *FL* добавить опцию *FP_c*.

На дискете, приложенной к отчету, имеется библиотека *LIBRA.LIB*, содержащая объектные модули подпрограмм, находящихся в файле *FLZ.FOR*. Таким образом, библиотека содержит объектные модули подпрограмм *FUND1*, *FUND2*, *FUND3*, *LINE1*, ..., *LINE8*, *ZNAK*, *ZNAK1* (программа моделирования посадки самолета не использует подпрограммы *FUND3*, *LINE7*, *LINE8*, поэтому они не упоминались при описании файла *FLZ.FOR* в разделе I.1). При создании библиотеки использовался режим компиляции, рассчитанный на работу с микропроцессором 8088, сопроцессором 8087 и *Large* - моделью памяти. Библиотеку *LIBRA.LIB* можно использовать при самостоятельной разработке программ моделирования.

2.2. Файл исходных данных

Структура файла исходных данных для программы моделирования процесса посадки описана в работе /1/. На дискете, прилагаемой к настоящему отчету, имеется файл *MOD.DAN*, содержащий массив исходных данных для программы моделирования процесса посадки. Рассмотрим подробно структуру информации в этом файле (рис. 2.1), используя обозначения из работы /1/.

Первая строка содержит целые числа $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_6$,

```

2,1,1,1,1,1
'\for\disk\poDLP
'\for\disk\poDBZ
'\for\disk\poDEZ
'\for\disk\fmPRO
'\for\disk\fmBOK
'\for\disk\fhPRO
'\for\disk\fhBOK
'\for\disk\poWX
'\for\disk\poWY
'\for\disk\poWZ
'\for\disk\BYXOD.DAN
2000.,15.,0.05,0.2
0.,0.,0.,0.
7.,600.,1200.,5000.,500.
5.,3.,5.
10.,10.,10.,10.,10.,10.
2
3,5
5,1

```

Рис. 2.1. Файл исходных данных программы моделирования процесса посадки.

определяющие способы выбора управляющих воздействий и помех.

Строки 2-4 задают имена файлов, содержащих линии переключения для управляющих воздействий δ_p , δ_B , δ_z .

Строки 5, 6 задают имена файлов, содержащих фундаментальные матрицы для бокового и продольного каналов.

Строки 7, 8 задают имена вспомогательных файлов для продольного и бокового каналов.

Строки 9-11 задают имена файлов, содержащих линии переключения для компонент помехи W_x , W_y , W_z .

Строка 12 определяет имя выходного файла, в который записывается результат работы программы.

Строка 13 содержит числа $d(0)$, τ , Δ , Δ_ξ - начальное расстояние, продолжительность вспомогательных дифференциальных игр, шаг построения линий переключения во вспомогательных дифференциальных играх, шаг интегрирования моделируемой нелинейной системы.

Строка 14 содержит начальные отклонения от номинального режима: $\Delta y_g(0)$, $\Delta V_{gy_g}(0)$, $\Delta z_g(0)$, $\Delta V_{gz_g}(0)$.

В строке 15 находятся величины VO , HO , RO , DX , DZ - параметры микровзрыва и значения, определяющие его положение относительно взлетно-посадочной полосы.

Строка 16 задает компоненты скорости ветра $V1$, $V2$, $V3$ в режиме формирования постоянного ветра. В режиме формирования ветра по игровому принципу эти величины имеют смысл крайних значений скорости ветра, то есть $v_x =$

$$|V1| \cdot \text{sgn}(v_x), \quad v_y = |V2| \cdot \text{sgn}(v_y), \quad v_z = |V3| \cdot \text{sgn}(v_z).$$

Строка I7 содержит величины h_1 , h_2 , h_3 , ε_1 , ε_2 , ε_3 , определяющие комбинированный способ выбора управляющих воздействий δ_p , δ_B , δ_3 .

В строке I8 находится число N , определяющее количество компонент фазового вектора, которые будут выводиться на экран и в выходной файл.

Строка I9 содержит номера записываемых в выходной файл и выводимых на экран компонент фазового вектора.

В последней строке находятся числа M , L , первое из которых определяет шаг вывода компонент фазового вектора, второе — шаг выбора значений компонент возмущения в процессе моделирования / 1 / .

Отметим, что структура файла *MOD. DAN* несколько отличается от описанной в работе / 1 / , а именно, добавлены строки 7–10, определяющие имена вспомогательных файлов и файлов для формирования помехи по игровому способу. При подготовке файла с исходными данными следует придерживаться правил I)–4) из раздела I.2.

2.3. Процесс счета

В начале сеанса работы программа запрашивает имя файла с исходными данными. Пользователь в ответ на приглашение вводит имя файла или признак окончания работы. Если программа не находит файл с указанным именем, то выдается сообщение об ошибке и приглашение повторяется. В случае успешного открытия файла программа запрашивает пользователя о необходимости вывода на экран информации в ходе счета. Информация на экран

выдается в том же виде, что и в выходной файл.

Структура выходного файла описана в /1/ ; пример такого файла имеется на дискете, приложенной к отчету (файл *ВУХОД. DAN*). Выходной файл специфицируется программой как файл прямого доступа форматного обмена с длиной записи, равной $68 + 10 \times N$, где N — количество выводимых компонент фазового вектора. Рассматривая файл *ВУХОД. DAN* (рис. 2.2), видим, что первая запись (строка) содержит числа N, M, R выведенные по формату (1X, 3I4). Напомним, что R — количество записей (строк) выходного файла. Последняя запись содержит значения показателей качества φ_* , φ^* продольного и бокового каналов. Эта запись сделана по формату (1X, 'Продольная плата =', F10.3, 2X, 'Боковая плата =', F10.3). Каждая из оставшихся записей (строк) содержит: текущий момент времени, набор выделенных координат фазового вектора, значения компонент вектора управлений, значения компонент вектора помех. Информация в эту запись выведена по формату (1X, F7.3, 40F10.3).

Зная формат записей выходного файла, пользователь может прочитать информацию и применять ее по своему усмотрению, например, для получения графиков, таблиц и т.д.

3. ПОСТРОЕНИЕ ЛИНИЙ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ДЛЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

Программа построения линий переключения, описанная в разделе I, рассчитана на случай, когда матрицы A, B, C , определяющие конфликтно-управляемую линейную систему, являются постоянными. Небольшая модификация головной программы

2	5	34							
.000	.000	.000	1.334	.000	.000	5.000	3.000	5.000	
1.000	-.034	.012	1.342	-.175	-.175	5.000	-3.000	5.000	
2.000	-.345	.113	1.353	.175	.175	-5.000	3.000	-5.000	
3.000	-.629	.335	1.354	-.175	.175	5.000	-3.000	-5.000	
4.000	-.742	.605	1.350	.175	-.175	-5.000	3.000	5.000	
5.000	-.738	.889	1.344	-.175	.175	5.000	-3.000	-5.000	
6.000	-.677	1.231	1.339	.175	-.175	-5.000	3.000	5.000	
7.000	-.611	1.615	1.334	-.175	.175	5.000	-3.000	5.000	
8.000	-.532	2.033	1.332	.175	.175	-5.000	3.000	5.000	
9.000	-.399	2.480	1.323	-.175	-.175	5.000	3.000	5.000	
10.000	.125	2.928	1.307	.175	.175	-5.000	3.000	5.000	
11.000	1.346	3.377	1.279	.175	.175	-5.000	3.000	5.000	
12.000	3.075	3.810	1.251	.175	.175	-5.000	3.000	5.000	
13.000	4.979	4.161	1.229	.175	.175	-5.000	3.000	5.000	
14.000	6.766	4.423	1.208	.175	.175	-5.000	3.000	-5.000	
15.000	8.441	4.603	1.190	.175	-.175	-5.000	3.000	5.000	
16.000	9.935	4.651	1.174	.175	-.175	-5.000	3.000	5.000	
17.000	11.168	4.596	1.162	.175	-.175	-5.000	3.000	5.000	
18.000	12.148	4.551	1.154	.175	.175	-5.000	3.000	5.000	
19.000	12.888	4.592	1.147	.175	.175	-5.000	3.000	5.000	
20.000	13.257	4.721	1.139	-.175	.175	-5.000	3.000	5.000	
21.000	13.188	4.888	1.130	-.175	.175	-5.000	3.000	5.000	
22.000	12.560	5.031	1.124	-.175	-.175	-5.000	3.000	5.000	
23.000	11.393	5.103	1.118	.175	-.175	-5.000	3.000	5.000	
24.000	9.922	5.099	1.106	.175	-.175	-5.000	3.000	5.000	
25.000	8.501	5.024	1.096	.175	.175	-5.000	3.000	5.000	
26.000	7.557	4.893	1.096	-.175	.175	-5.000	3.000	5.000	
27.000	6.880	4.720	1.101	-.175	-.175	-5.000	3.000	5.000	
28.000	6.427	4.511	1.112	.175	-.175	-5.000	3.000	5.000	
29.000	6.569	4.401	1.131	.175	.175	-5.000	3.000	5.000	
30.000	7.561	4.514	1.162	-.175	.175	-5.000	3.000	5.000	
30.400	7.899	4.599	1.167	-.175	.175	-5.000	3.000	5.000	
ПРОД ПЛАТА=		3.394	БОК ПЛАТА=		.912				

Рис. 2.2. Выходной файл программы моделирования процесса посадки.

LINES и подпрограммы *FU* позволяет охватить случай нестационарной линейной системы. Модифицированные необходимым образом программы *LINES* и *FU* находятся в файле

LINEST.FOR, прилагаемой к отчету дискеты. При использовании варианта, рассчитанного на нестационарный случай, необходимо написать собственные подпрограммы *AAA*, *BBB*, *CCC*, вычисляющие матрицы $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ в зависимости от параметра t . Указанные подпрограммы должны иметь следующую форму

```
SUBROUTINE AAA (T,A)
```

```
DIMENSION A (15,15)
```

```
вычисление компонент матрицы A(t)
```

```
RETURN
```

```
END
```

```
SUBROUTINE BBB (T,B)
```

```
DIMENSION B (15,5)
```

```
вычисление компонент матрицы B(t)
```

```
RETURN
```

```
END
```

```
SUBROUTINE CCC (T,C)
```

```
DIMENSION C (15,5)
```

```
вычисление компонент матрицы C(t)
```

```
RETURN
```

```
END
```

Для получения загрузочного модуля программы нужно выполнить следующие операции (предполагается, что подпрограммы AAA, BBB, CCC, находятся в файле с именем *SUBPOLZ.FOR*)

FL_/F_ LINEST_ LINEST.FOR_/C

FL_/F_ LINSUB1_ LINESUB1.FOR_/C

FL_/F_ LINSUB2_ LINESUB2.FOR_/C

FL_/F_ SUBPOLZ_ SUBPOLZ.FOR_/C

LINK_ LINEST + LINSUB1 + LINSUB2 +

+ SUBPOLZ , LINEST.EXE, NUL,

LLIBFOR7.LIB.

При формировании файла исходных данных необходимо выбросить строки, содержащие коэффициенты матриц *A* , *B* , *C* . В остальном порядок и структура исходных данных сохраняется.

4. ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ ПОСАДКОЙ САМОЛЕТА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

4.1. Нелинейная система движения самолета

Математическая модель движения самолета на посадке взята из статьи /4/.

Рассматривается движение в вертикальной плоскости. В качестве возмущения используются вертикальная и горизонтальная составляющие вектора скорости ветра в центре масс самолета. Управление самолетом осуществляется через изменение угла атаки и силы тяги.

Основные переменные:

- V - воздушная скорость самолета [м/с],
- γ - угол между вектором воздушной скорости и горизонтальной осью [рад],
- x - горизонтальная координата [М],
- h - вертикальная координата (высота) [М],
- W_x - горизонтальная компонента скорости ветра в точке нахождения самолета [м/с],
- W_h - вертикальная компонента скорости ветра в точке нахождения самолета [м/с],
- α - угол атаки [рад],
- δ - угол между осью двигателей и продольной осью самолета [рад],
- m - масса самолета [кг],
- g - ускорение свободного падения [м/с²],
- T - сила тяги [Н],
- D - аэродинамическое сопротивление [Н],

- L - подъемная сила [Н],
 β - коэффициент установки тяги [безр],
 ρ - плотность воздуха [кг/м³],
 S - эффективная площадь самолета [м²].

В нелинейную модель входят два основных динамических уравнения:

$$\dot{V} = \frac{T}{m} \cos(\alpha + \delta) - \frac{D}{m} - g \sin \gamma - \dot{W}_x \cos \gamma - \dot{W}_h \sin \gamma \quad (4.1)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{T}{mV} \sin(\alpha + \delta) + \frac{L}{mV} - \frac{g}{V} \cos \gamma + \frac{1}{V} (\dot{W}_x \sin \gamma - \dot{W}_h \cos \gamma)$$

и два кинематических:

$$\dot{x} = V \cos \gamma + W_x \quad (4.2)$$

$$\dot{h} = V \sin \gamma + W_h.$$

Предполагается, что поле скоростей ветра стационарно, поэтому производные по времени от компонент скорости ветра удовлетворяют соотношениям

$$\dot{W}_x = \frac{\partial W_x}{\partial x} (V \cos \gamma + W_x) + \frac{\partial W_x}{\partial h} (V \sin \gamma + W_h) \quad (4.3)$$

$$\dot{W}_h = \frac{\partial W_h}{\partial x} (V \cos \gamma + W_x) + \frac{\partial W_h}{\partial h} (V \sin \gamma + W_h).$$

Кроме того, заданы функциональные соотношения

$$T = T(V, \beta), \quad D = D(V, \alpha), \quad L = L(V, \alpha).$$

Выражение для силы тяги имеет вид

$$T = \beta T_*, \quad T_* = A_0 + A_1 V + A_2 V^2. \quad (4.4)$$

Здесь β - коэффициент установки тяги, T_* - стандартная тяга. Коэффициенты A_0 , A_1 , A_2 зависят от высоты ВПП над уровнем моря и окружающей температуры.

Аэродинамическое сопротивление и подъемная сила берутся в виде:

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho S V^2, \quad L = \frac{1}{2} C_L \rho S V^2, \quad (4.5)$$

$$C_D = B_0 + B_1 \alpha + B_2 \alpha^2, \quad C_L = \begin{cases} C_0 + C_1 \alpha, & \alpha < \alpha_{**} \\ C_0 + C_1 \alpha + C_2 (\alpha - \alpha_{**}), & \alpha_{**} \leq \alpha \leq \alpha_* \end{cases}$$

Коэффициенты B_0 , B_1 , B_2 , C_0 , C_1 , C_2 зависят от положения закрылков и шасси, α_{**} - заданная константа.

Фазовыми переменными в модели являются V , γ , x , h , управляющими параметрами - угол атаки α и коэффициент установки тяги β .

В модели из статьи /4/ заданы ограничения

$$\alpha \leq \alpha_* \quad , \quad - \dot{\alpha}_* \leq \dot{\alpha} \leq \dot{\alpha}_* \quad ,$$

$$\beta_* \leq \beta \leq 1 \quad , \quad - \dot{\beta}_* \leq \dot{\beta} \leq \dot{\beta}_* \quad ,$$

где α_* , $\dot{\alpha}_*$, β_* , $\dot{\beta}_*$ - фиксированные числа. Для реализации ограничений на производные в /4/ используется специальный прием с использованием тригонометрических функций. В данной работе ограничения на производные величин α и β вводятся при помощи дополнительных соотношений

$$\dot{\alpha} = k_{\alpha}(u_{\alpha} - \alpha), \quad \dot{\beta} = \begin{cases} \dot{\beta}_* \operatorname{sign} u_{\beta}, & \beta \in (\beta_0, 1), \\ 0, & \beta \notin (\beta_0, 1). \end{cases} \quad (4.6)$$

Управляющие воздействия u_{α} , u_{β} следует выбирать так, чтобы отклонение самолета от прямолинейной глиссады снижения в процессе посадки было возможно меньшим. При этом самолет проходит через зону ветрового возмущения, вызванного микровзрывом. В статье /4/ структура микровзрыва и его расположение предполагались заранее известными. Мы будем считать, что такая информация отсутствует. Закон управления по принципу обратной связи будет найден из решения вспомогательной линейной дифференциальной игры аналогично тому, как это описано в отчетах /1-3/. Эффективность полученного способа управления будет исследована затем при моделировании движений исходной нелинейной системы (4.1)-(4.6). Изменение ветра будет задаваться при помощи модели микровзрыва из /4/.

В расчетах использовались следующие численные значения:

$$\rho = 1.20064 \text{ кг/м}^3, \quad S = 140.4 \text{ м}^2, \quad m = 67500 \text{ кг},$$

$$\delta = 0.03491 \text{ рад}, \quad g = 9.81 \text{ м/с}^2,$$

$$A_0 = 196710 \text{ н}, \quad A_1 = -352,866 \text{ нс/м}, \quad A_2 = 0.7073 \text{ нс}^2/\text{м}^2,$$

$$B_0 = 0.16, \quad B_1 = 0.0862 \text{ }^1/\text{РАД}, \quad B_2 = 3 \text{ }^1/\text{РАД}^2,$$

$$C_0 = 0.71, \quad C_1 = 6.231 \text{ }^1/\text{РАД}, \quad C_2 = -21.65 \text{ }^1/\text{РАД}^2,$$

$$K_\alpha = 0.17442 \text{ }^1/\text{с}, \quad \beta_* = 0.2, \quad \dot{\beta} = 0.3 \text{ }^1/\text{с}.$$

4.2. Модель микровзрыва

В статье /4/ модель микровзрыва задается соотношениями

$$W_x = \lambda A(x), \quad W_h = \lambda \frac{h}{h_*} B(x). \quad (4.7)$$

Коэффициент λ характеризует интенсивность микровзрыва, h_* - фиксированная высота (300 м). Функции $A(x)$, $B(x)$ заданы графически. В данной работе использовались функции

$$A(r) = \begin{cases} -15, & r < -750, \\ r/50, & -750 \leq r \leq 750, \\ 15, & r > 750, \end{cases} \quad (4.8)$$

$$B(r) = -16 \exp(-(0.0019 r)^6) + 1.5 \exp(-(0.0019 r)^2),$$

графики которых близки к приведенным в статье /4/. Здесь r -

расстояние до центра микровзрыва.

4.3. Линейная система

Линейная система для вспомогательной дифференциальной игры получена путем линеаризации исходной нелинейной системы относительно номинального равномерного движения по прямолинейной глассаде при нулевом ветре.

В линейной системе приняты следующие обозначения:

$$x_1 = \Delta V, \quad x_2 = \Delta \gamma, \quad x_3 = W_x, \quad x_4 = W_h, \\ x_5 = \Delta \alpha, \quad x_6 = \Delta h, \quad x_7 = \Delta \dot{h}, \quad u_1 = \Delta \beta, \quad u_2 = u_\alpha.$$

Система имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 = & \frac{1}{m} (T_o^V \cos(\alpha_o + \delta) - D_o^V) x_1 - g \cos \gamma_o x_2 + \quad (4.9) \\ & + k_w \cos \gamma_o x_3 + k_w \sin \gamma_o x_4 - \frac{1}{m} (T_o \sin(\alpha_o + \delta) + D_o^\alpha) x_5 + \\ & + \frac{1}{m} T_o^\beta \cos(\alpha_o + \delta) u_1 - k_w \cos \gamma_o v_1 - k_w \sin \gamma_o v_2 \\ \dot{x}_2 = & \frac{1}{m V_o} (T_o^V \sin(\alpha_o + \delta) + L_o^V) x_1 + \frac{g}{V_o} \sin \gamma_o x_2 - \\ & - \frac{1}{V_o} k_w \sin \gamma_o x_3 + \frac{1}{V_o} k_w \cos \gamma_o x_4 + \\ & + \frac{1}{m V_o} (T_o \cos(\alpha_o + \delta) + L_o^\alpha) x_5 + \frac{1}{m V_o} T_o^\beta \sin(\alpha_o + \delta) u_1 + \\ & + \frac{1}{V_o} k_w \sin \gamma_o v_1 - \frac{1}{V_o} k_w \cos \gamma_o v_2 \end{aligned}$$

$$\dot{x}_3 = -k_W x_3 + k_W v_1$$

$$\dot{x}_4 = -k_W x_4 + k_W v_2$$

$$\dot{x}_5 = -k_\alpha x_5 + k_\alpha u_2$$

$$\dot{x}_6 = x_7$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_7 = & \frac{1}{m} \left(T_o^V \sin(\gamma_o + \alpha_o + \delta) + L_o^V \cos \gamma_o - D_o^V \sin \gamma_o \right) x_1 + \\ & + \frac{1}{m} \left(T_o^\alpha \cos(\gamma_o + \alpha_o + \delta) + L_o^\alpha \cos \gamma_o - D_o^\alpha \sin \gamma_o \right) x_5 + \\ & + \frac{1}{m} T_o^\beta \sin(\gamma_o + \alpha_o + \delta) u_1 \end{aligned}$$

В приведенных формулах T_o^V означает производную T по V в номинальном режиме. Аналогичный смысл имеет T_o^β и т.д. Коэффициент k_α задает инерционность изменения угла атаки. Инерционность изменения составляющих скорости ветра определяется коэффициентом k_W . Управляющими параметрами в системе (4.9) являются u_1 , u_2 . Воздействие помехи определяется параметрами v_1 , v_2 .

В качестве номинального движения взято равномерное движение со скоростью $V_o = 71.91$ м/с при нулевом ветре по прямой глиссаде с углом наклона $\gamma_o = -3^\circ = -0.05236$ рад. Получаемые при этом номиналы угла атаки α_o и коэффициента установки тяги β_o имеют значения

$$\alpha_o = 7.25^\circ = 0.1265 \text{ рад}, \quad \beta_o = 0,29669$$

Коэффициент k_W взят равным 0.2.

Численный вид линейной системы (4.9):

$$\dot{x}_1 = -0.03648 x_1 - 9.7966 x_2 + 0.19973 x_3 - \quad (4.10)$$

$$-0.01047 x_4 - 4.4671 x_5 + 2.5588 u_1 -$$

$$-0.19973 v_1 + 0.01047 v_2$$

$$\dot{x}_2 = 0.00374 x_1 - 0.00714 x_2 + 0.00015 x_3 +$$

$$+ 0.00278 x_4 + 0.57005 x_5 + 0.00579 u_1 -$$

$$- 0.00015 v_1 - 0.00278 v_2$$

$$\dot{x}_3 = -0.2 x_3 + 0.2 v_1$$

$$\dot{x}_4 = -0.2 x_4 + 0.2 v_2$$

$$\dot{x}_5 = -0.17442 x_5 + 0.17442 u_2$$

$$\dot{x}_6 = x_7$$

$$\dot{x}_7 = 0.27039 x_1 + 40.7153 x_5 + 0.28208 u_1$$

4.4. Вспомогательная линейная дифференциальная игра

Систему линейных дифференциальных уравнений (4.10) запишем в векторной форме:

$$\dot{x} = Ax + Bu + Cv, \quad x \in R^7, \quad (4.II)$$

$$u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}, \quad v = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \end{pmatrix}.$$

Условимся, что воздействия u_1 , u_2 принадлежат первому игроку, v_1 , v_2 - второму. Считаем их ограниченными по модулю:

$$|u_1| \leq 0.7, \quad |u_2| \leq 11.46^\circ = 0.2 \text{ рад}$$

$$|v_1| \leq 22 \text{ м/с}, \quad |v_2| \leq 18 \text{ м/с}.$$

Введем функцию платы φ_* , зависящую от координат $x_6 = \Delta h$ и $x_7 = \Delta \dot{h}$. Для этого рассмотрим на плоскости x_6 , x_7 выпуклый шестиугольник M_* , симметричный относительно нуля. Его вершины: $(-3, 0)$, $(-3, 1)$, $(0, 1)$, $(3, 0)$, $(3, -1)$, $(0, -1)$. Положим

$$\varphi(x_6, x_7) = \min \{c \geq 0 : (x_6, x_7)' \in c M_*\}.$$

Множество M_* можно трактовать как допуск на отклонения Δh , $\Delta \dot{h}$. Функция φ_* показывает отклонение от допуска.

Рассмотрим антагонистическую дифференциальную игру с динамикой (4.II), фиксированным моментом окончания T и платой φ_* . Первый игрок минимизирует значения платы φ_* в момент T , второй - максимизирует. Примем $T = 10$ с.

Оптимальная стратегия первого игрока в игре (4.II) будет использована для задания управления движением самолета. Стратегия реализуется при помощи линий переключения, которые в

свою очередь получают в результате обработки максимальных стабильных мостов. На рис. 4.1 показаны сечения максимального стабильного моста, построенного от множества M_x . Изображенные сечения соответствуют моментам $\tau = 0, 1, 3, 5, 7, 9$ с обратного времени. Линии переключения для управляющих воздействий u_1, u_2 показаны на рис. 4.2, 4.3. При построении линий использовались стабильные мосты, построенные от множеств $M_c = cM_x$ при $c = 0.1, 0.5, 1.2, 3, 6, 8$.

4.5. Результаты моделирования

Общая схема моделирования соответствует той, что описана в отчетах /1-3/. Ветровое возмущение формируется при помощи модели микровзрыва (4.7), где параметр λ взят равным 1.2. При этом продольная составляющая скорости ветра меняется вдоль движения самолета от -18 м/с до +18 м/с. Вертикальная составляющая зависит от высоты, на которой самолет проходит зону микровзрыва.

Начальное положение самолета на глиссаде взято равным 5500 м от торца ВПП. Начальные условия для системы (4.1):

$$\begin{aligned}\bar{\gamma} &= -2.249^\circ = -0.03925 \text{ рад}, \\ \bar{\alpha} &= 7.226^\circ = 0.12612 \text{ рад}, \quad \bar{\beta} = 0.34627\end{aligned}$$

соответствуют движению по глиссаде с заданной воздушной скоростью $V_0 = 71.91$ м/с при продольном ветре - 18 м/с и нулевом вертикальном ветре (до входа в зону микровзрыва продольный ветер постоянен и равен - 18 м/с, вертикальный ветер отсутствует).

Построение движение проводилось до момента пролета торца ВПП ($h = 12, 15$ м).

СЕЧЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО СТАБИЛЬНОГО МОСТА

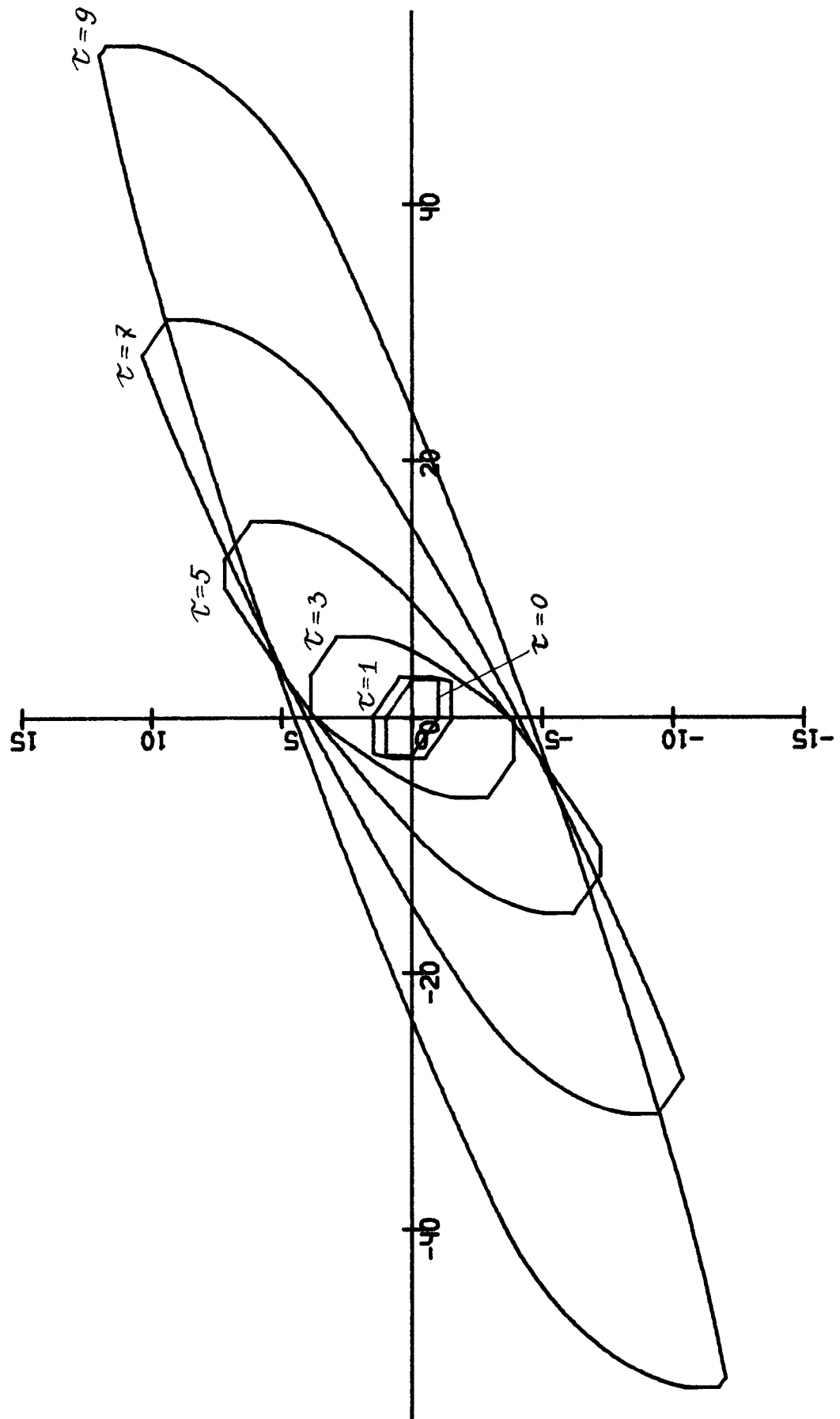


Рис. 4.1

ЛИНИИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОЙ ТЯГИ

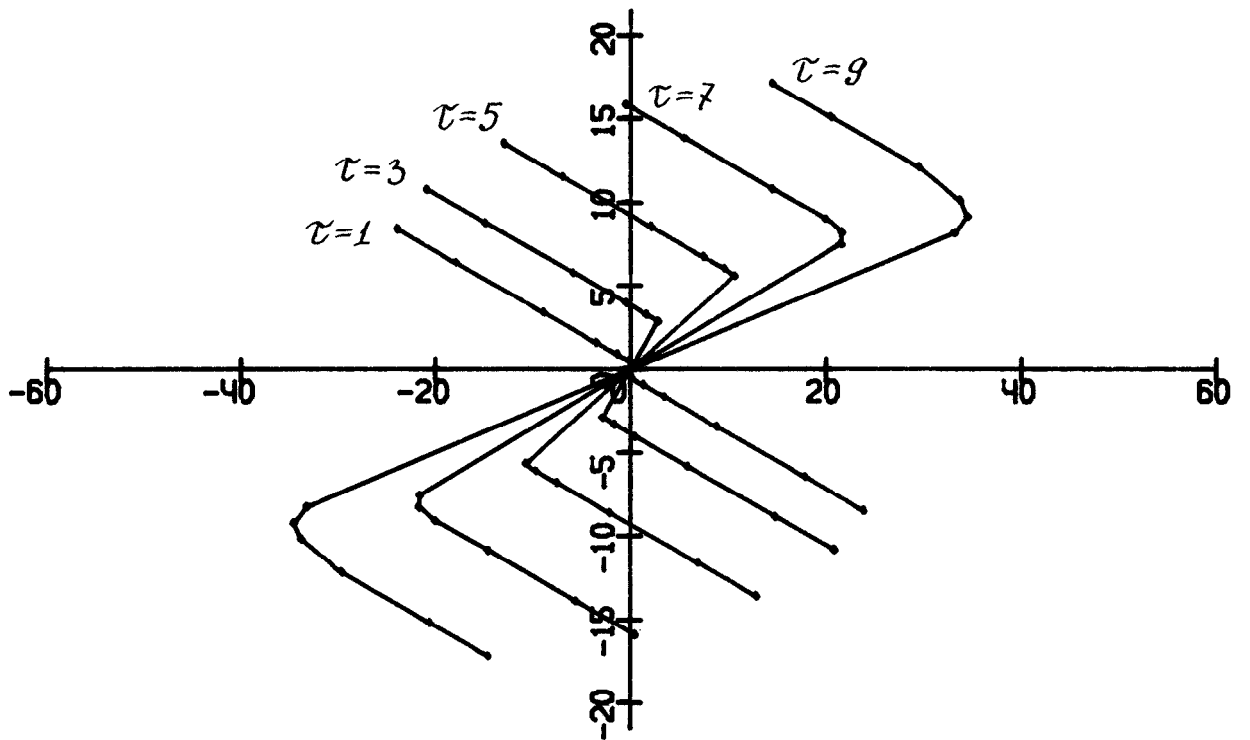


Рис. 4.2

ЛИНИИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПО УГЛУ АТАКИ

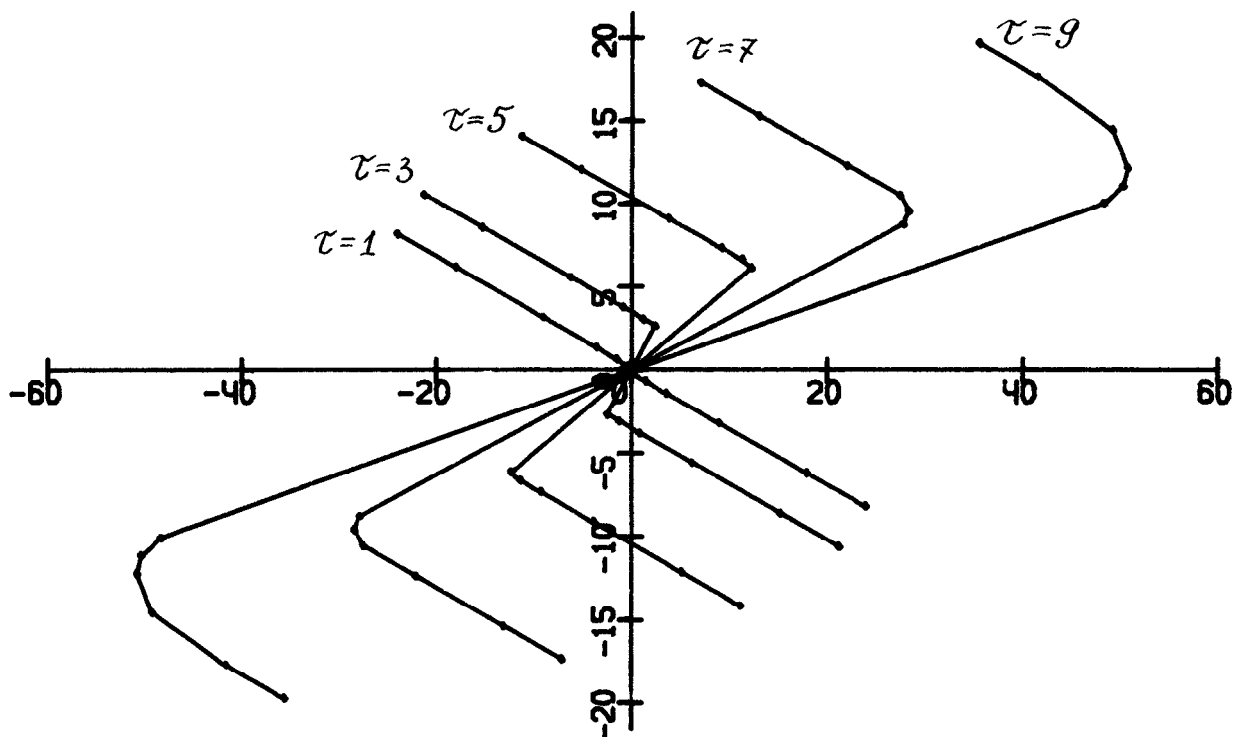


Рис. 4.3

Управления u_α , u_β формировались при помощи линий переключения, полученных из решения вспомогательной дифференциальной игры. Для каждой компоненты u_α , u_β использовался блок из 200 линий переключения, построенных на промежутке 10 с с шагом 0.05 с. Та или иная линия переключения выбиралась на основе оценки времени, оставшегося до момента пролета торца ВПП. Пусть \tilde{t} - время до пролета (соответствующее номинальной скорости). Для выбора управлений u_α , u_β используются линии переключения, соответствующие моменту, ближайшему к остатку от деления \tilde{t} на 10 .

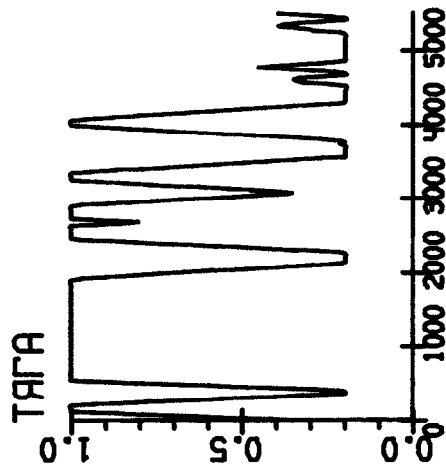
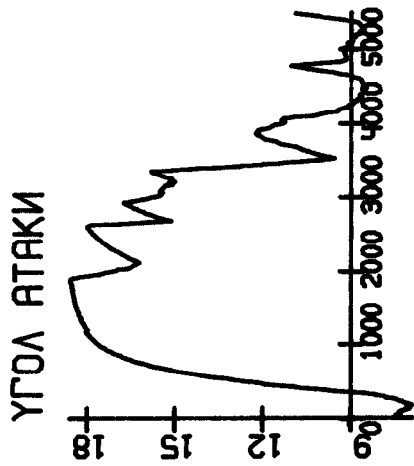
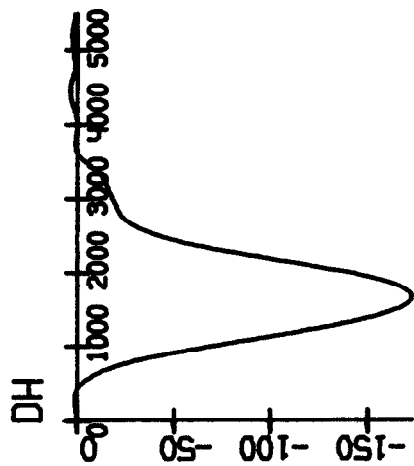
Результаты моделирования, проведенного на ЭВМ БЭСМ-6, представлены на рис. 4.4-4.12. Всюду по горизонтали откладывается пройденное расстояние. Линейные величины взяты в метрах, угловые - в градусах. Символ DH означает отклонение по высоте от глиссады, $TETA = \gamma + \alpha$ - угол тангажа. В правом верхнем углу помещены значение платы φ_* в момент пролета торца ВПП, значение НК высоты в момент пролета и время ТК пролета торца.

Рассмотрены три варианта расположения центра микровзрыва по горизонтали от начального положения самолета: $DR = 750$ м (рис. 4.4, 4.5), $DR = 3250$ м (рис. 4.6-4.10), $DR = 5250$ м (рис. 4.11; 4.12). Основное различие между вариантами - величина перепада вертикального ветра вдоль движения.

Помимо способа управления при помощи изменения угла атаки и коэффициента установки тяги, для каждого варианта рассчитывались траектории, где управление велось только по углу атаки, а тяга полагалась постоянной (рис. 4.5, 4.7, 4.12). Видно, что управление при постоянной тяге не является удовлетворительным.

Шаг Δ выбора управления был равен 0.05 с. Исключение составляют результаты на рис. 4.8 и 4.10, где $\Delta = 0.1$ с.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ (DR=750)



ПЛАТА= 0.659

НК= 13.0

ТК= 77.050

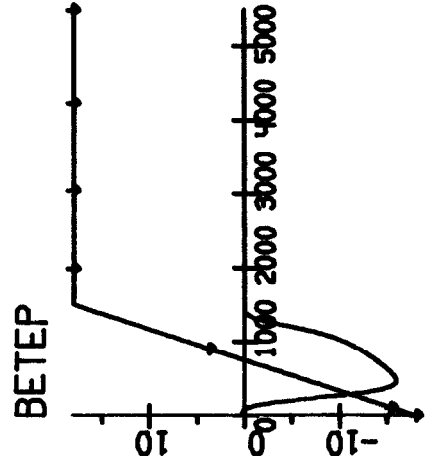
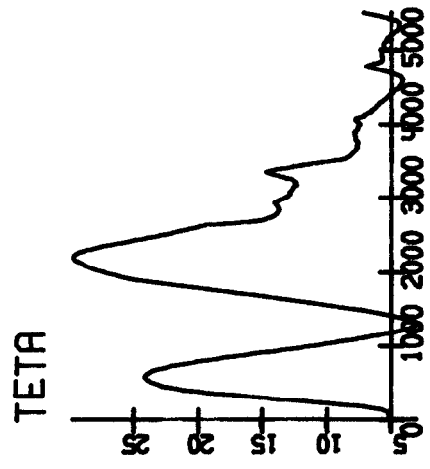
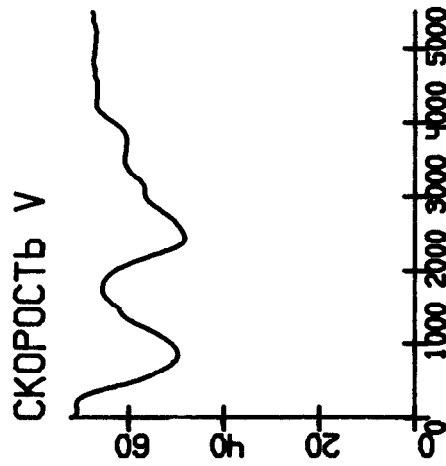
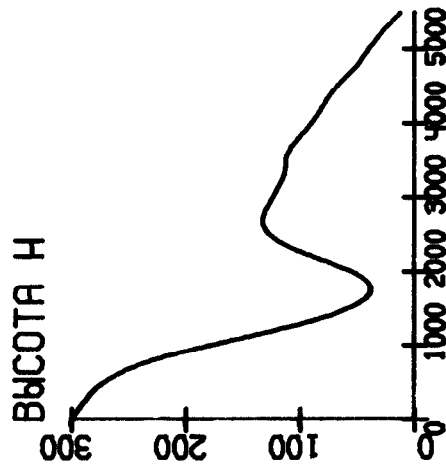


Рис. 4.4

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ (DR=750, $\beta \approx \bar{\beta}$)

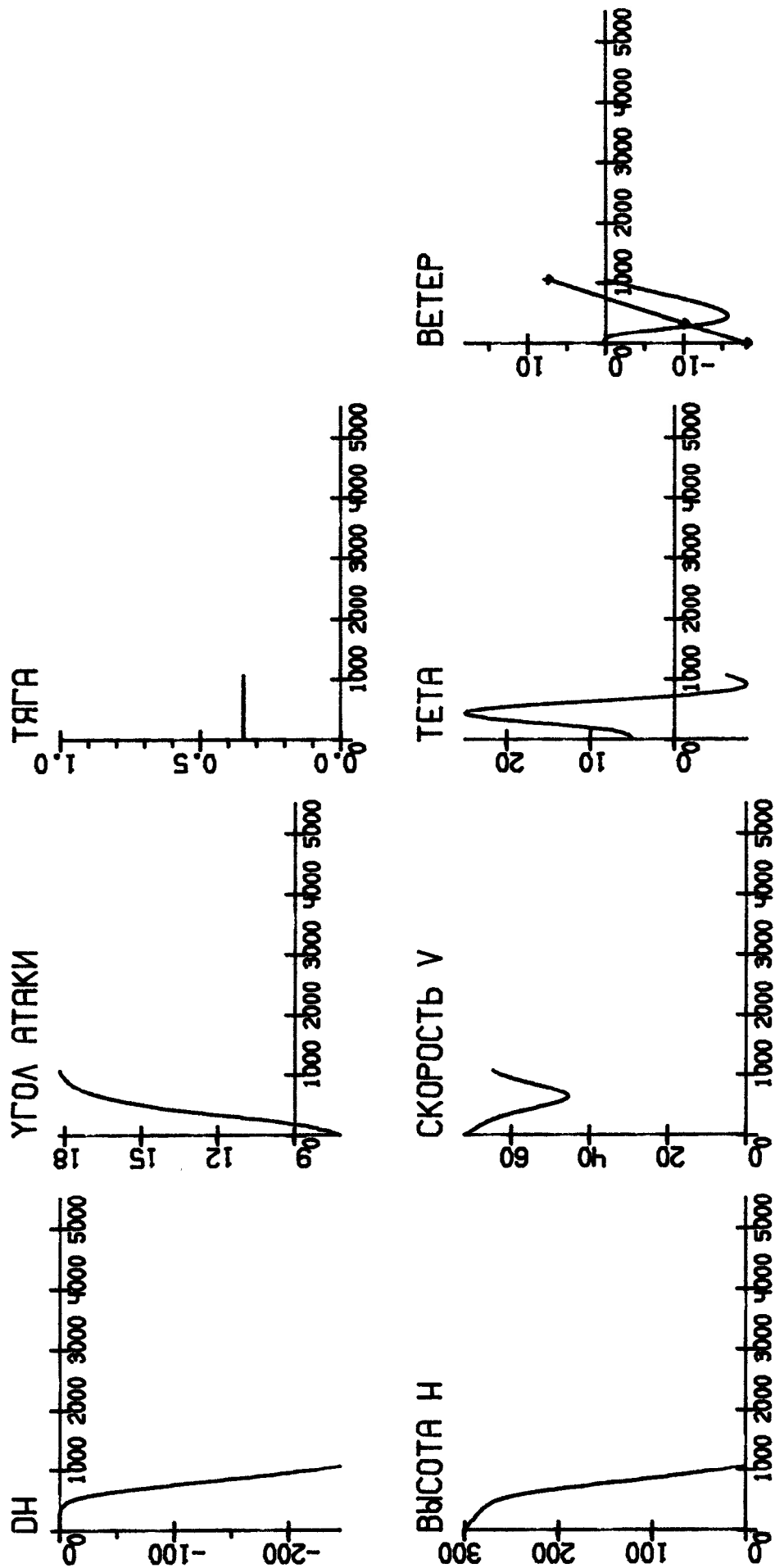


Рис. 4.5

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ (DR=3250)

ПЛАТА= 0.729

НК= 13.1

ТК= 74.700

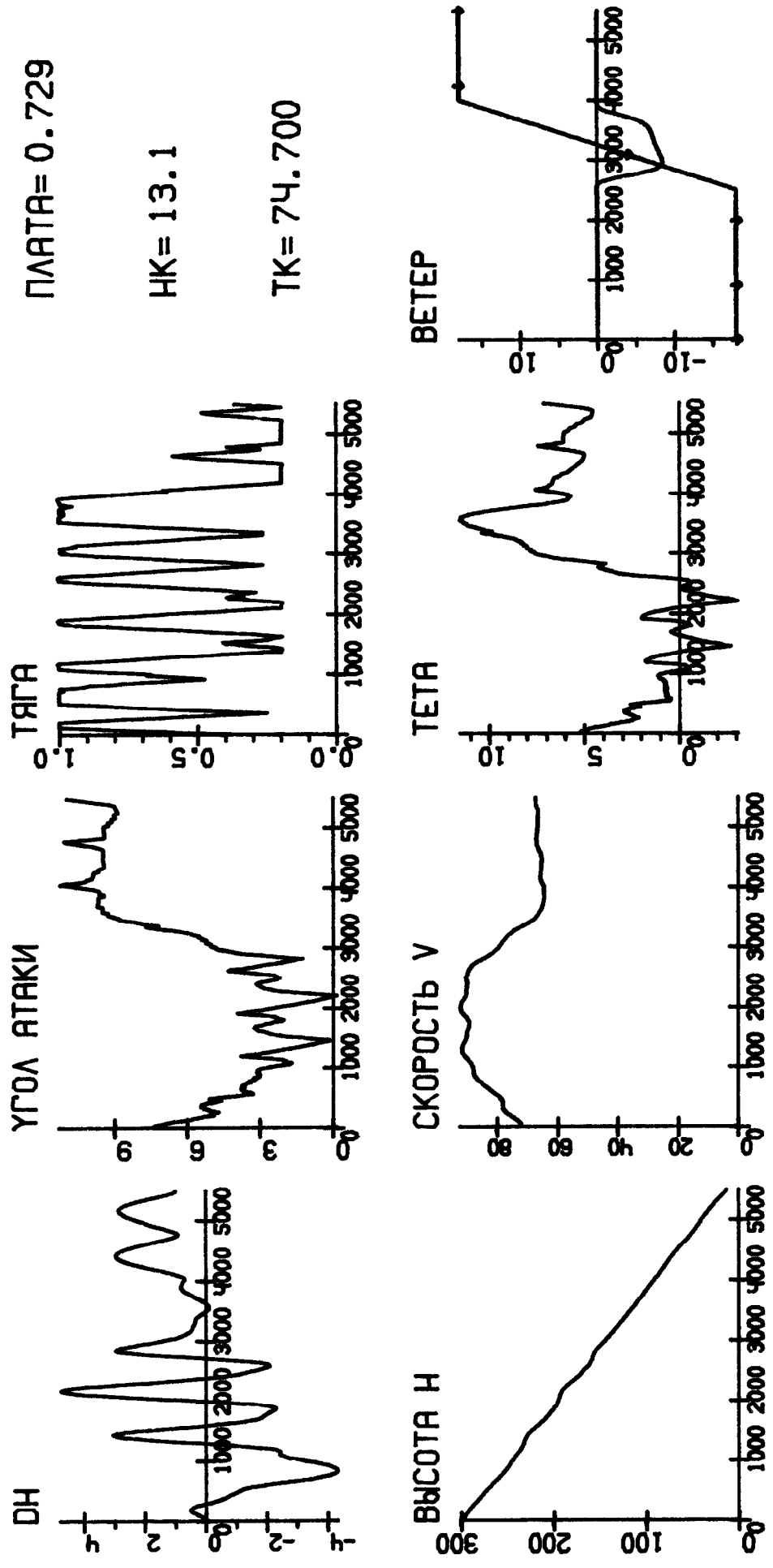


Рис. 4.6

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ (DR=3250, $\beta = \bar{\beta}$)

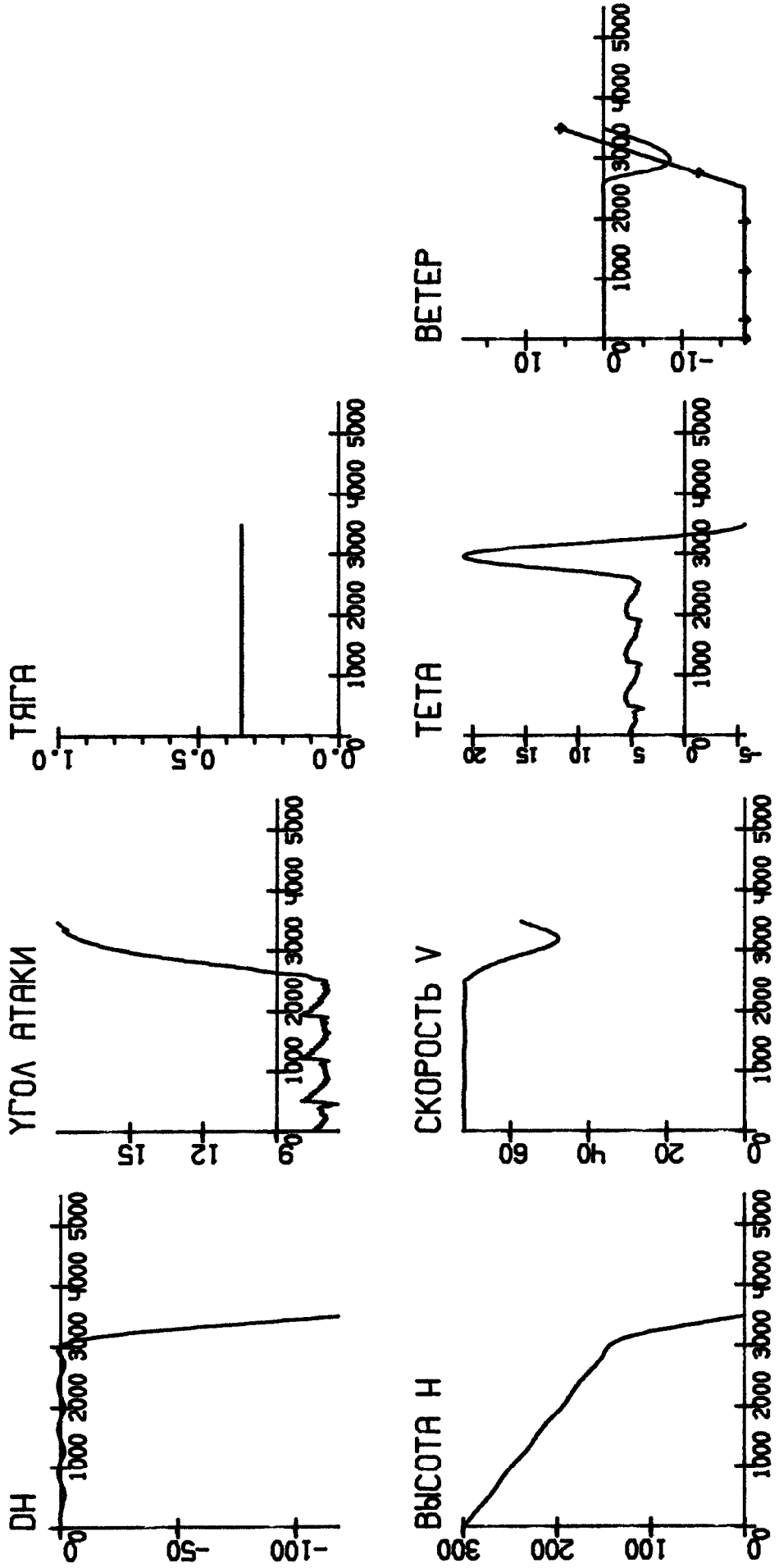


Рис. 4.7

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ (DR=3250 $\Delta=0.1$)

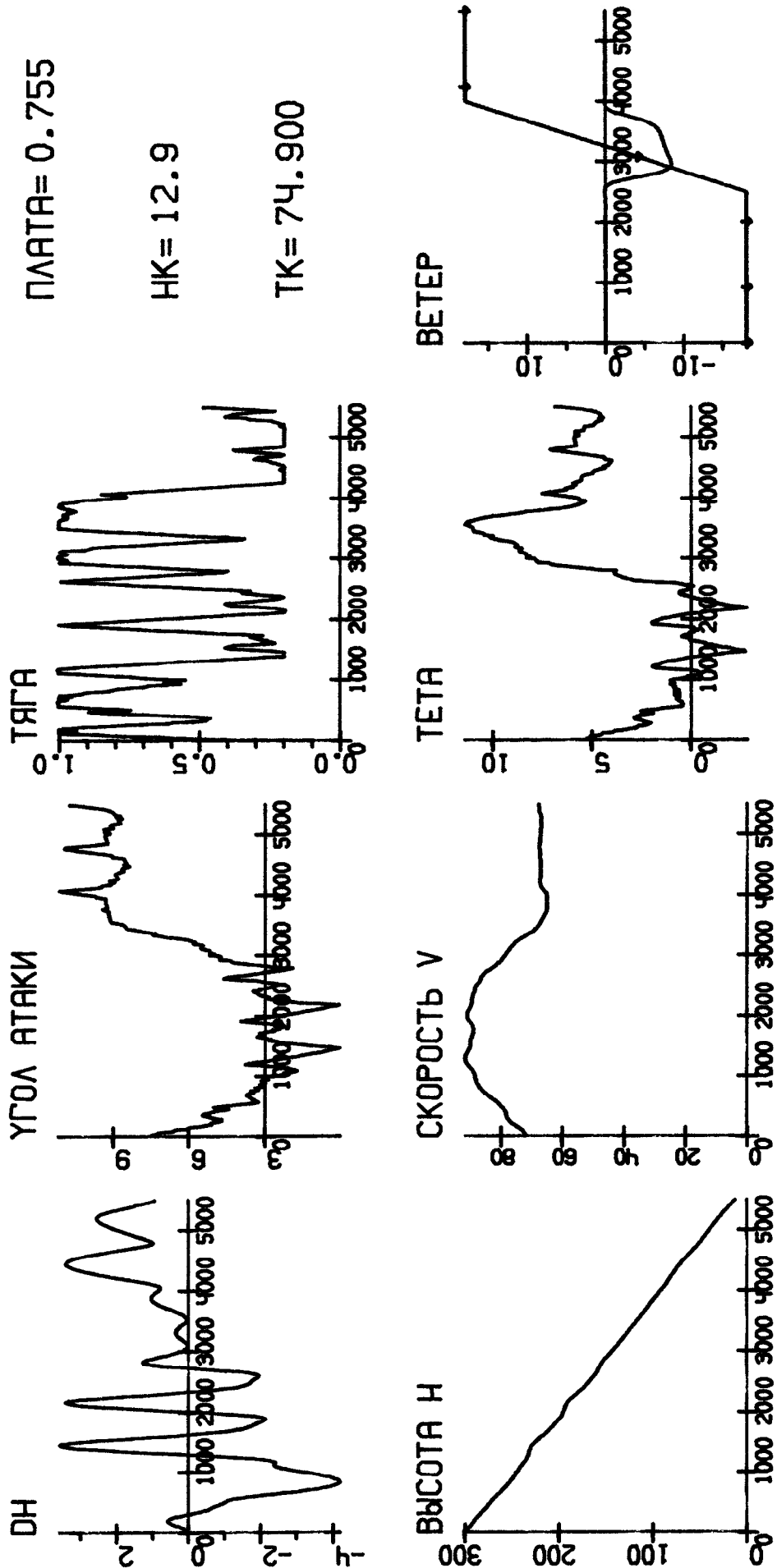


Рис. 4.8

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ (DR=3250 ВЕТЕР НЕ ЗАМЕРЯЕТСЯ)

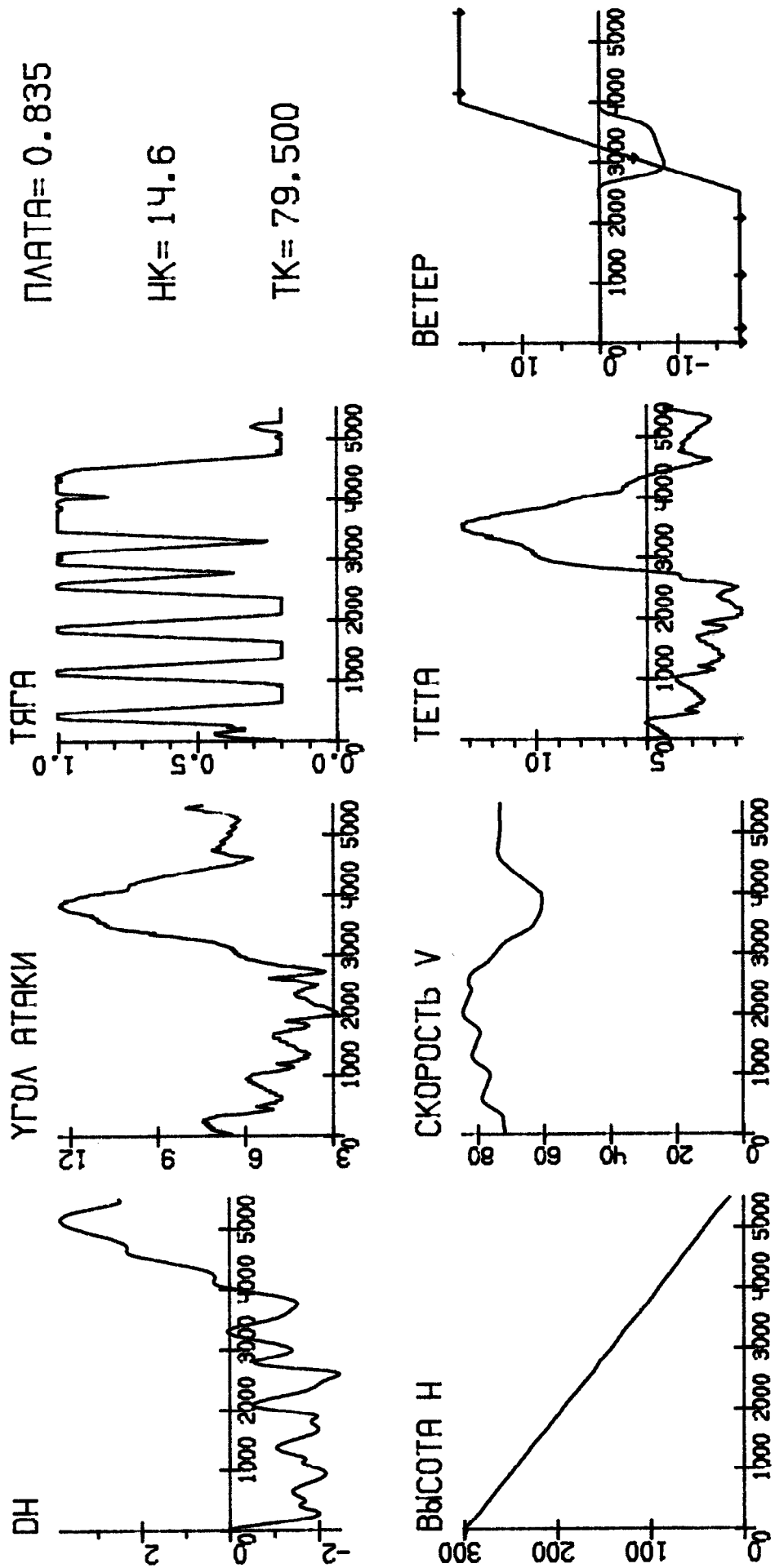


Рис. 4.9

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ (DR=3250 Δ =0.1, ВЕТЕР НЕ ЗАМЕРАЕТСЯ)

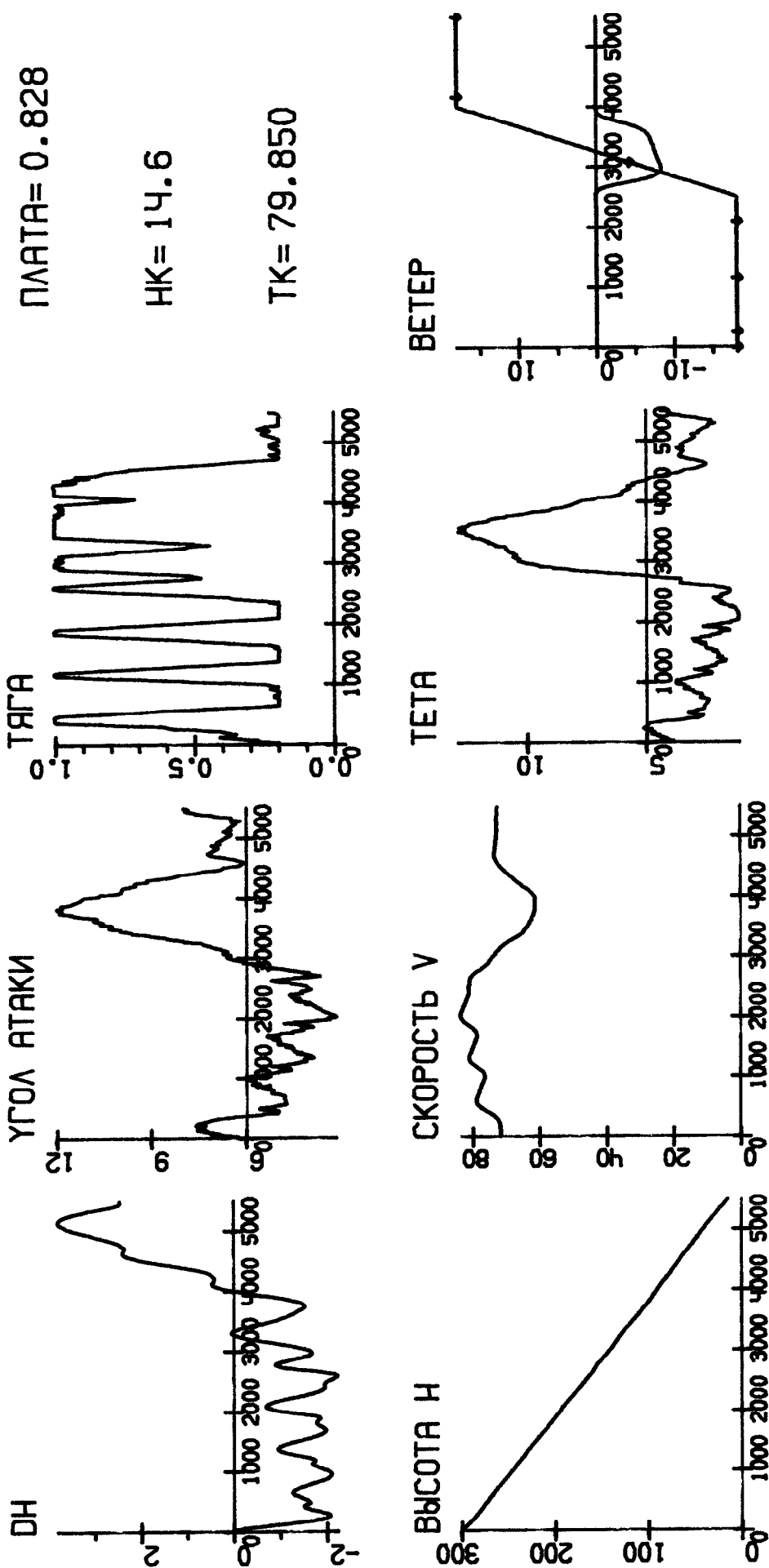


Рис. 4.10

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ (DR=5250)

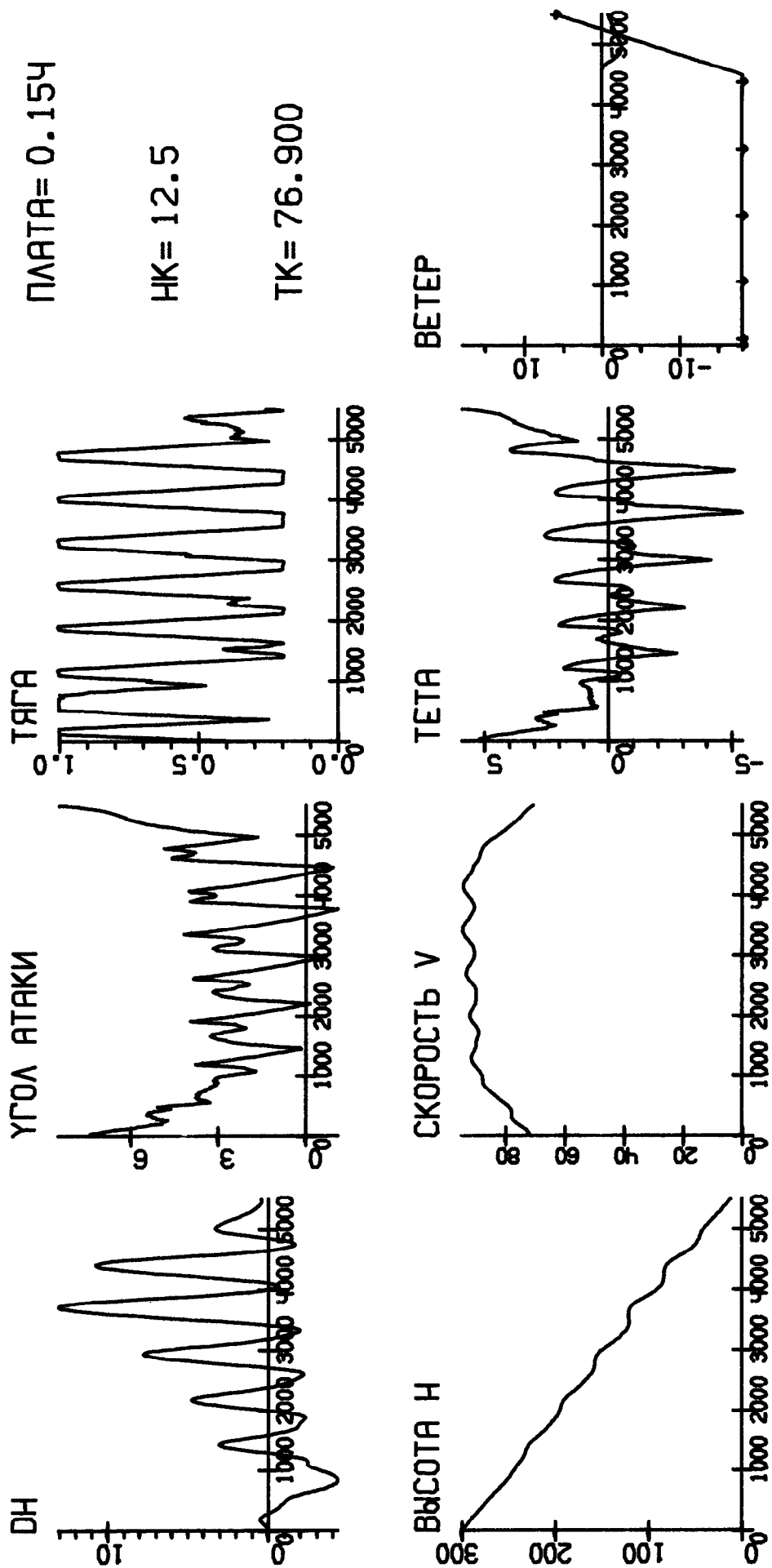


Рис. 4.11

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ (DR=5250, $\beta \equiv \bar{\beta}$)

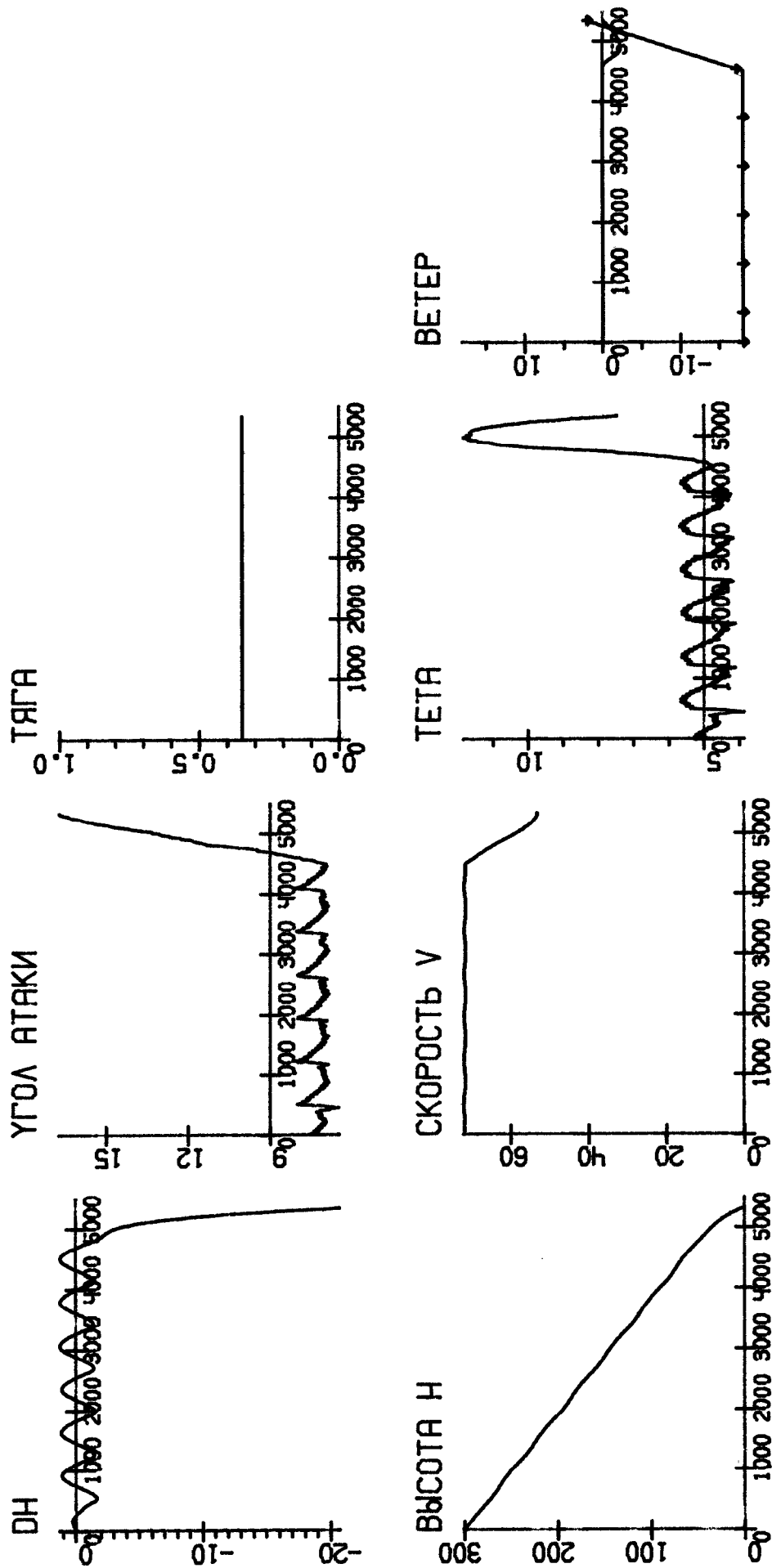


Рис. 4.12

Изменение шага от 0.05 до 0.1 не оказывает существенного влияния.

При выборе управления предполагались известными составляющие скорости ветра в текущий момент. Влияние отказа от этого допущения демонстрируется на рис. 4.9, 4.10, где ветер считался неизмеряемым.

В целом результаты моделирования качественно аналогичны помещенным в статье /4/. Еще раз отметим, что в /4/ расположение и поле скоростей микровзрыва предполагались известными заранее. Оптимальное программное управление находилось в рамках нелинейной системы (4.1) численно из решения соответствующей оптимизационной задачи. При нашем подходе управление формируется по принципу обратной связи. Для его нахождения нужно задать ориентировочно лишь пределы возможных отклонений компонент скорости ветра от некоторых номинальных ("средних") значений и сами номинальные значения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отчет завершает описание комплекса программ / I / синтеза экстремальных ветровых возмущений на этапе посадки самолета. Комплекс реализует два способа формирования экстремальных ветровых возмущений: на основе решения вспомогательных игровых задач и путем имитации природного явления ветрового микровзрыва. При решении вспомогательных игровых задач может быть также получен способ формирования управления самолетом.

В отчете рассматриваются вопросы генерации загрузочных модулей, правила формирования файлов исходных данных. Подробно описывается структура и формат выходных файлов. Указывается на возможность работы с нестационарными системами. Описание ведется применительно к персональной ЭВМ IBM PC с операционной системой *DOS* 3.2.

В последнем разделе отчета демонстрируется возможность построения управления самолетом на посадке при помощи используемых в программном комплексе конструкций.

Дальнейшая работа должна быть связана с адаптацией описанных программ к конкретным имитационным устройствам.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Разработка численных методов построения экстремальных ветровых возмущений, действующих на самолет на этапе посадки. Разработка пакета прикладных программ синтеза экстремальных ветровых возмущений на этапе посадки. Отчет о НИР (промежуточный) / Институт математики и механики УрО АН СССР; Руководитель В.С.Пацко.- № ГР 1880003467; Инв. № 02880069889.- Свердловск, 1988.- 39 с.: Ил.- Отв.исполн. Н.Д.Боткин, В.Л.Турова.- Библиогр. С.38-39.
2. Разработка численных методов построения экстремальных ветровых возмущений, действующих на самолет на этапе посадки. Разработка алгоритмов построения экстремальных ветровых возмущений: Отчет о НИР (промежуточн) / Институт математики и механики УрО АН СССР, Руководитель В.С.Пацко.- № ГР 1880003467; Инв. № 02880054701.- Свердловск, 1987.- 58 с. Ил.- Отв. исполн. В.С.Пацко, Н.Д.Боткин, В.Л.Турова.- Библиогр. С.55-56.
3. Разработка численных методов построения экстремальных ветровых возмущений, действующих на самолет на этапе посадки. Применение методов теории дифференциальных игр для имитации ветровых возмущений: Отчет о НИР (промежуточн) / Институт математики и механики УрО АН СССР; Руководитель В.С.Пацко.- № ГР 1880003467; Инв. № 02880044271.- Свердловск, 1987.- 46 с.: Ил.- Отв. исполн. В.С.Пацко, Н.Д.Боткин,- Библиогр. - С.44-46.
4. Miele A., Wang T., Wang H., Melvin W.W. Optimal penetration landing trajectories in the presence of windshear // J. Optimiz. Theory & Appl.- 1988.- Vol.57, no.1.- P.1-40.