

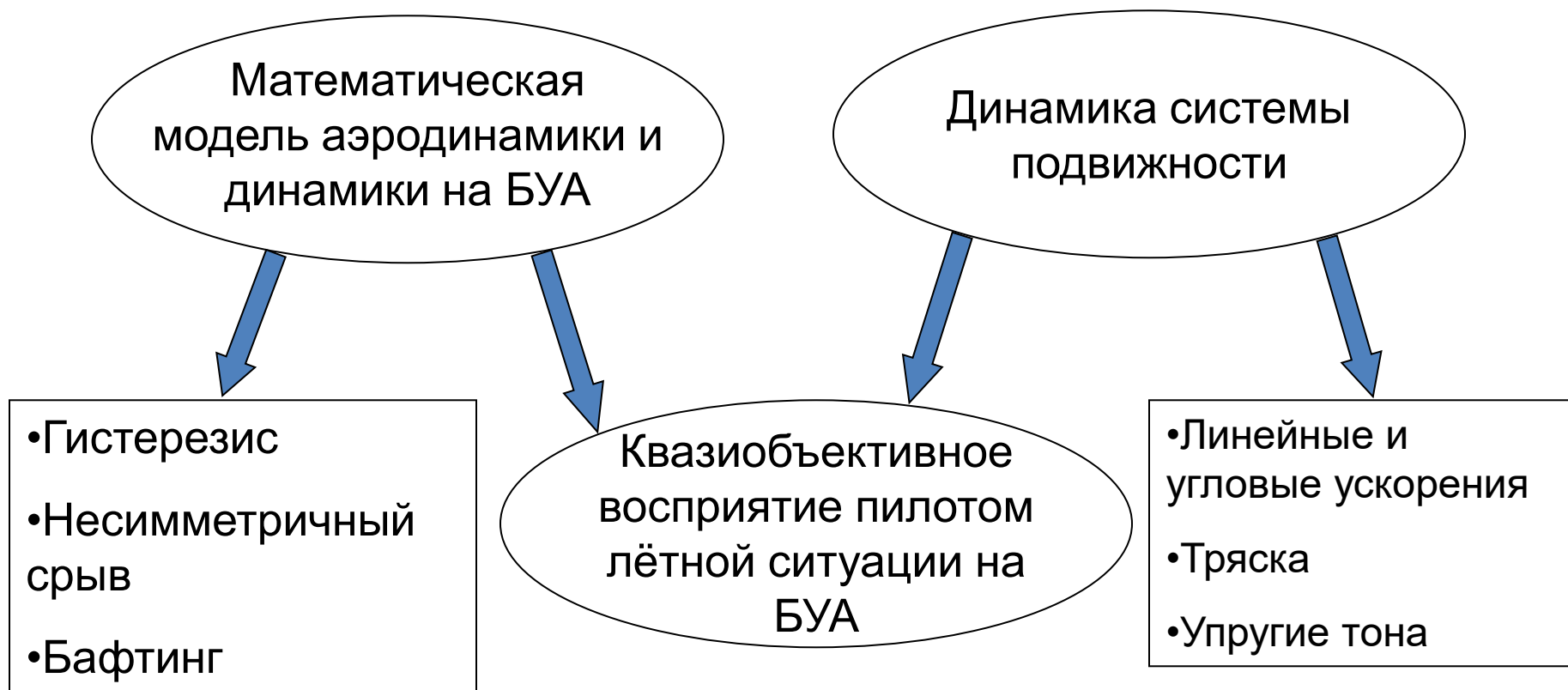
Проблемы моделирования динамики самолёта транспортной категории на больших углах атаки и сваливании

«ЦАГИ» г.Жуковский
flight15@tsagi.ru

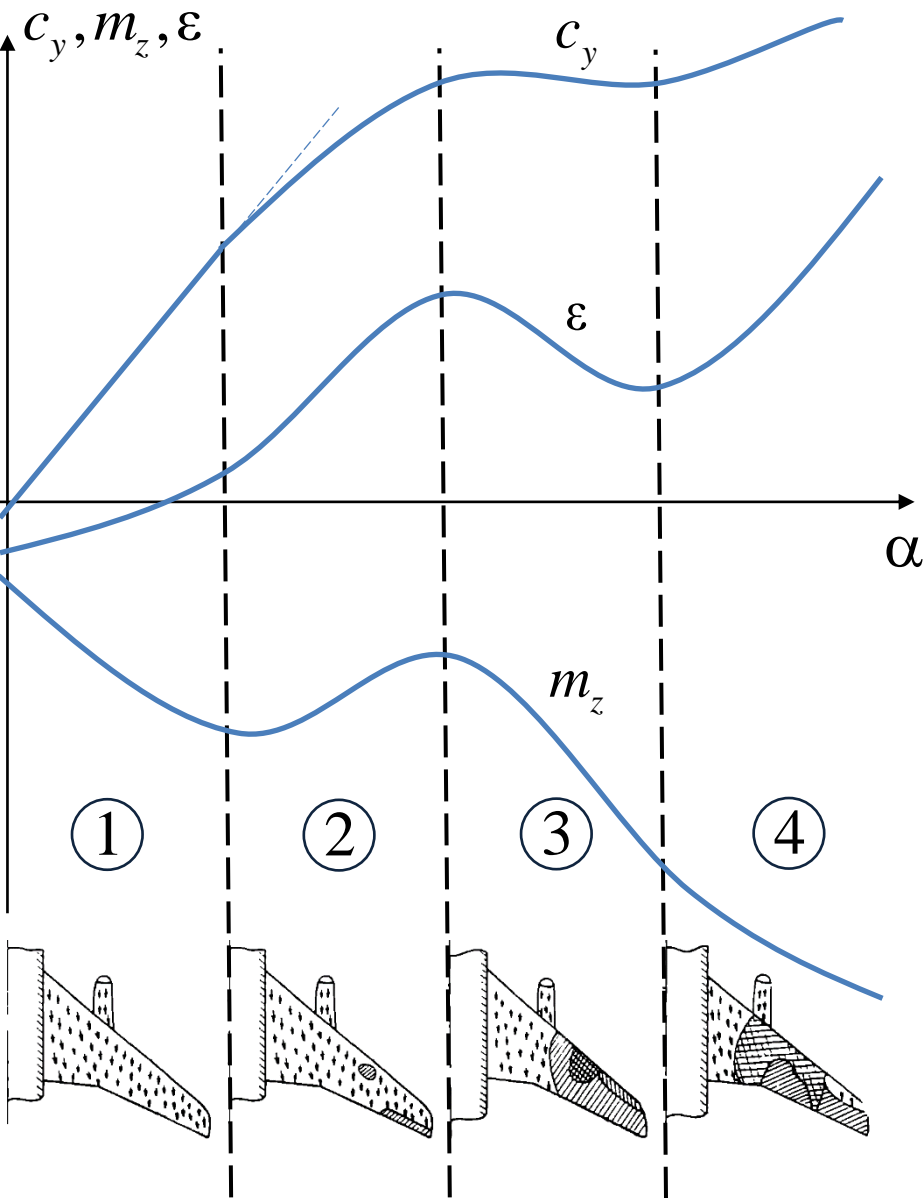
2018

Л.Е. Зайчик
П.В. Кузьмин
Н.А. Сурков
Ю.Ф. Шелюхин
Ю.П. Яшин

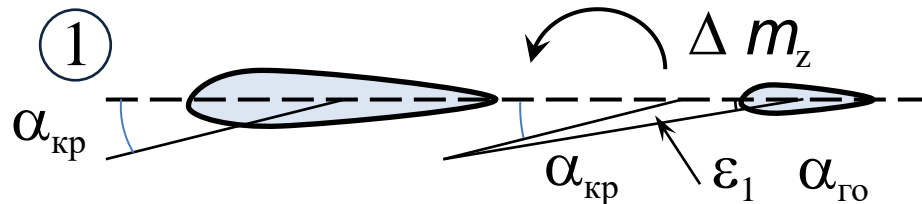
Моделирование динамики самолёта транспортной категории на БУА и сваливании



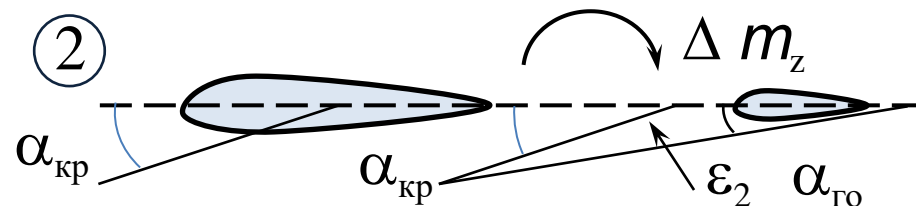
Статика



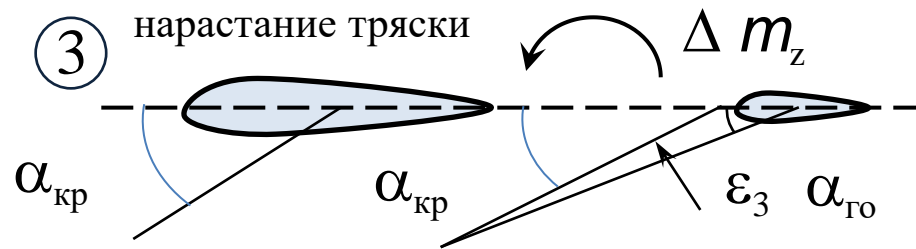
Безотрывное обтекание крыла



Концевой отрыв – начало тряски

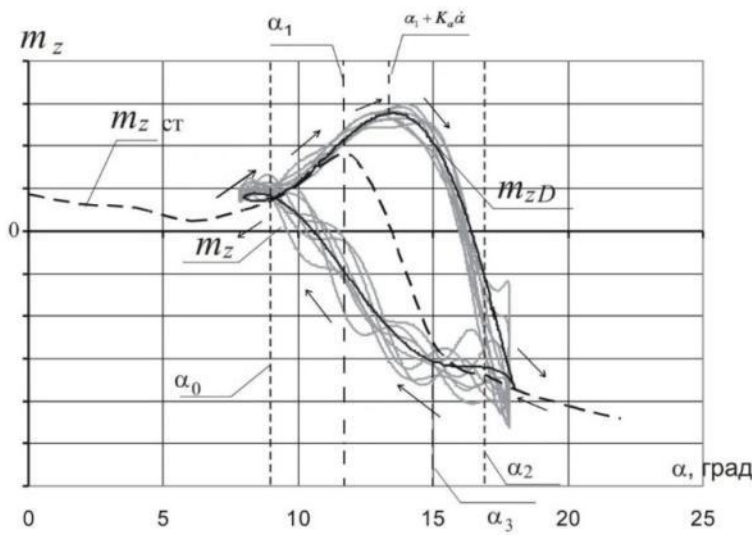
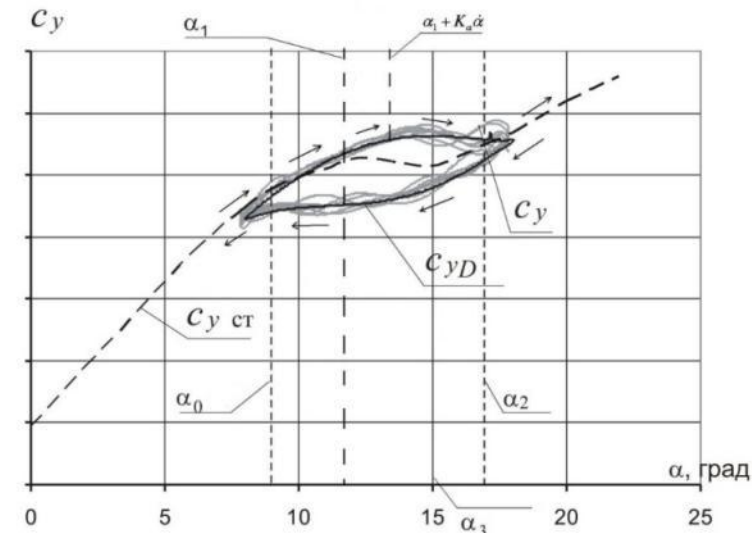


Отрывное обтекание



$$\varepsilon_1 < \varepsilon_2 > \varepsilon_3$$

Динамика - гистерезис



демпфирование

$$\dot{\alpha} > 0 \longrightarrow \Delta m_z < 0$$

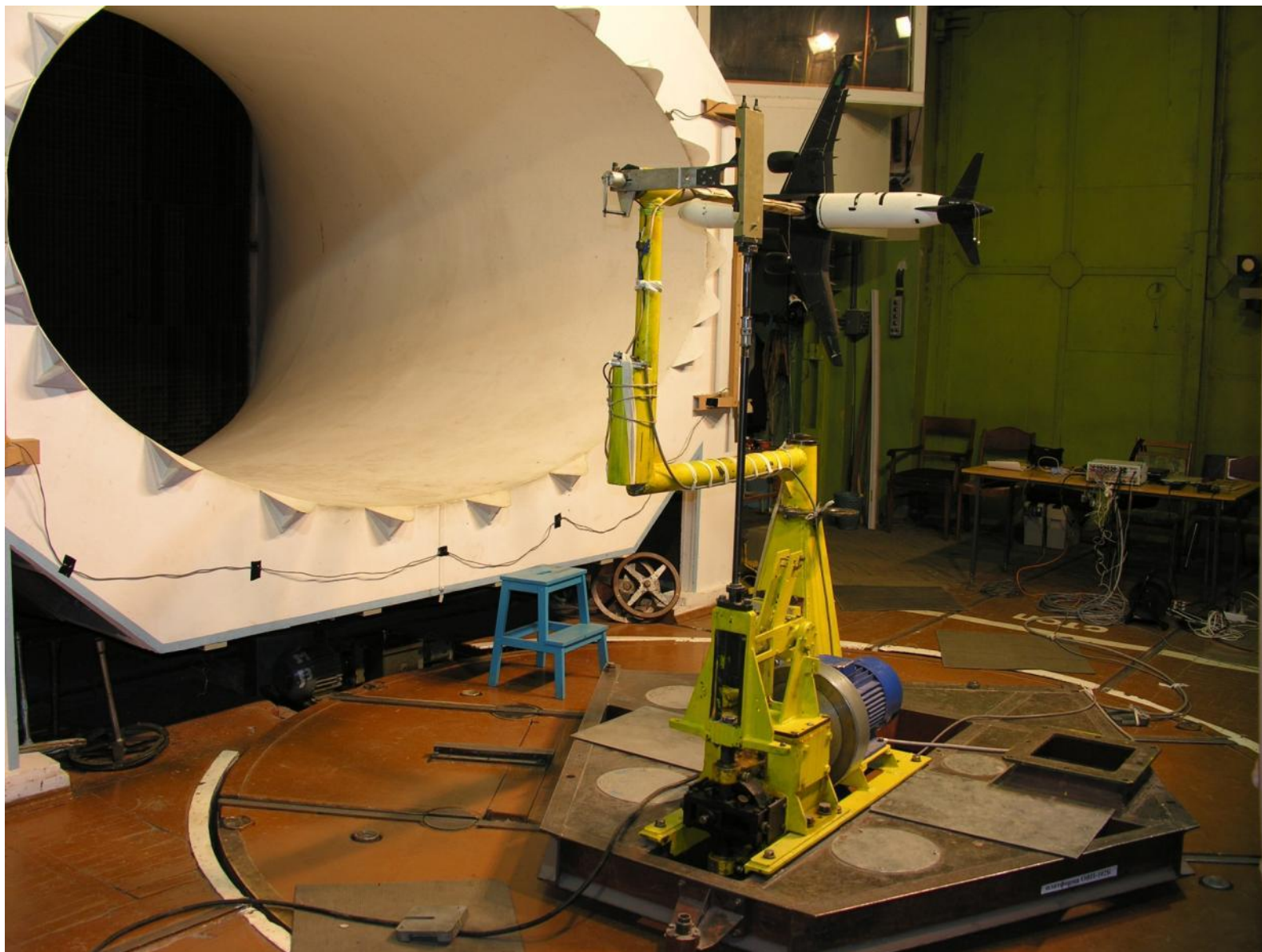
$$\dot{\alpha} < 0 \longrightarrow \Delta m_z > 0$$

антидемпфирование

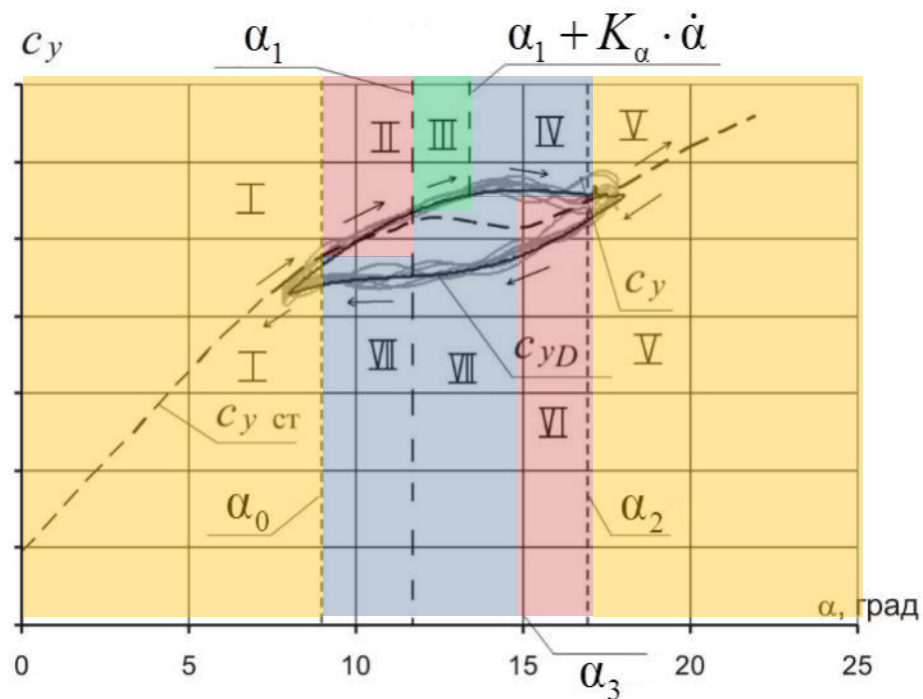
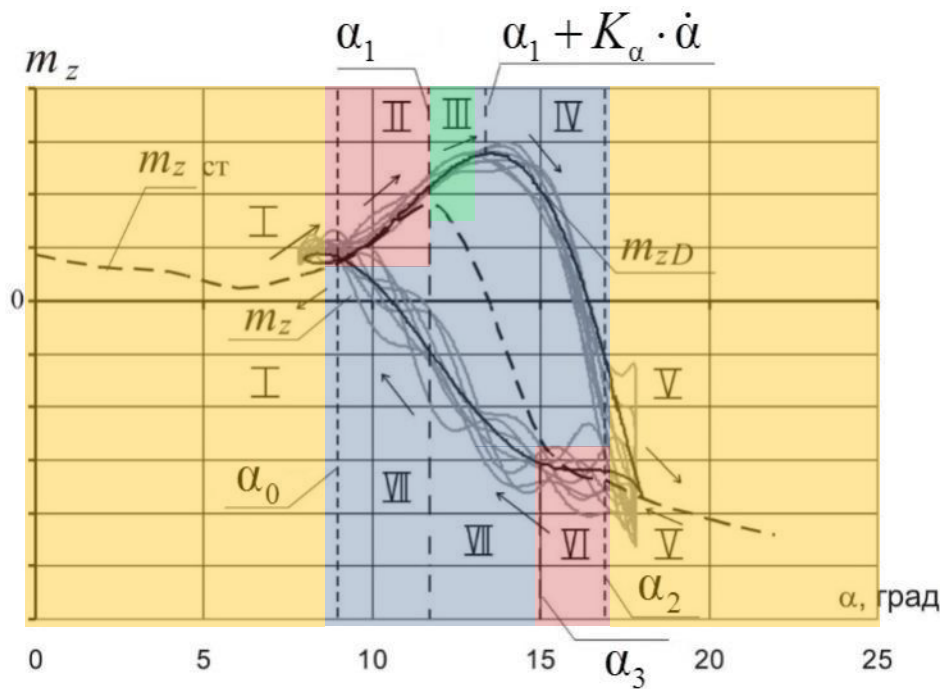
$$\dot{\alpha} < 0 \longrightarrow \Delta m_z < 0$$

$$\dot{\alpha} > 0 \longrightarrow \Delta m_z > 0$$

Установка ОВП-102Б



Модель гистерезиса продольных АДХ



$$\dot{\alpha}_{zr} = \frac{1}{T} (m_{z \text{ in}} - m_{zr})$$

$$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 = f(M, \delta_3, \delta_{пр})$$

$$c_{yr} = c_{ym} + c_{yl}$$

$$\dot{\alpha}_{ym} = \frac{1}{T} (c_{y \text{ in}} - c_{ym})$$

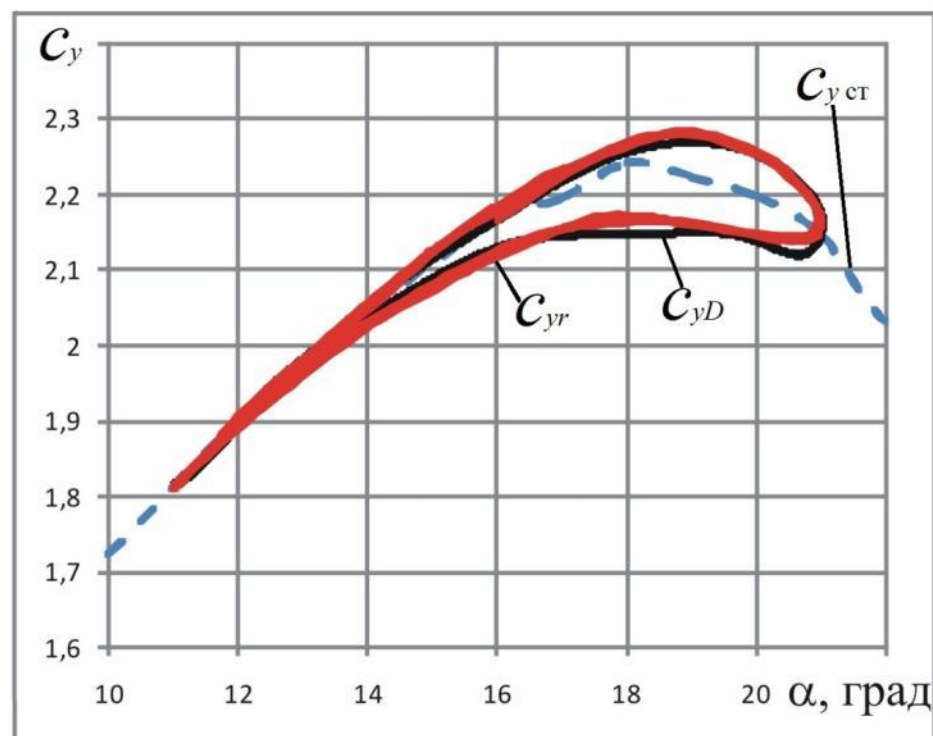
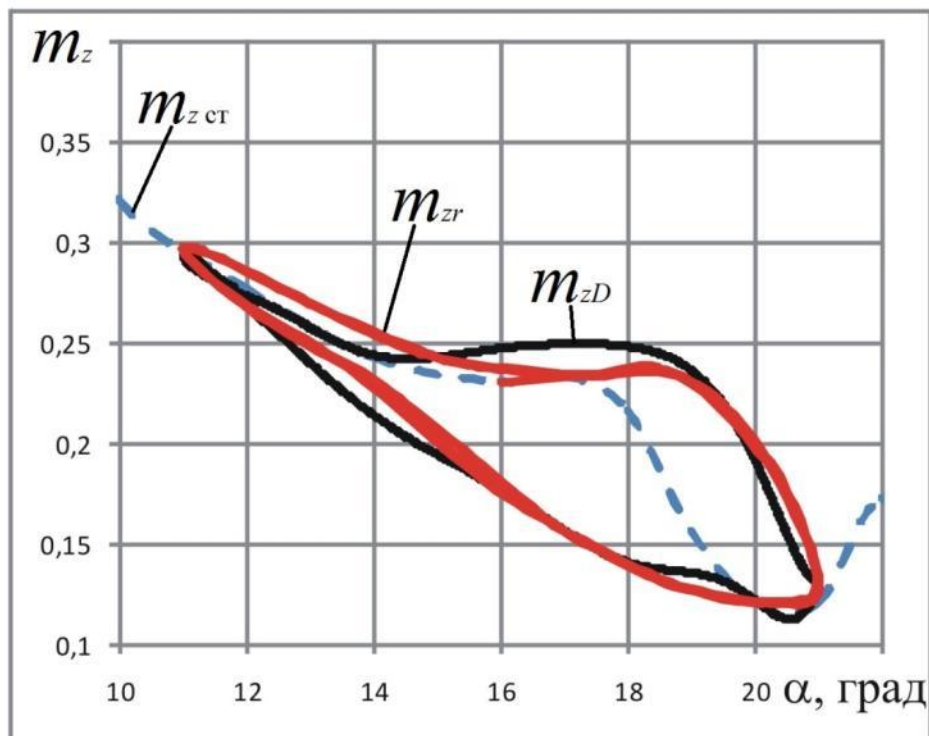
$$c_{yl} = c_y^\alpha \alpha$$

Сравнение расчётов с экспериментом в АДТ

$\alpha_{уст}, 16^\circ$

$\Delta\alpha = 5^\circ$

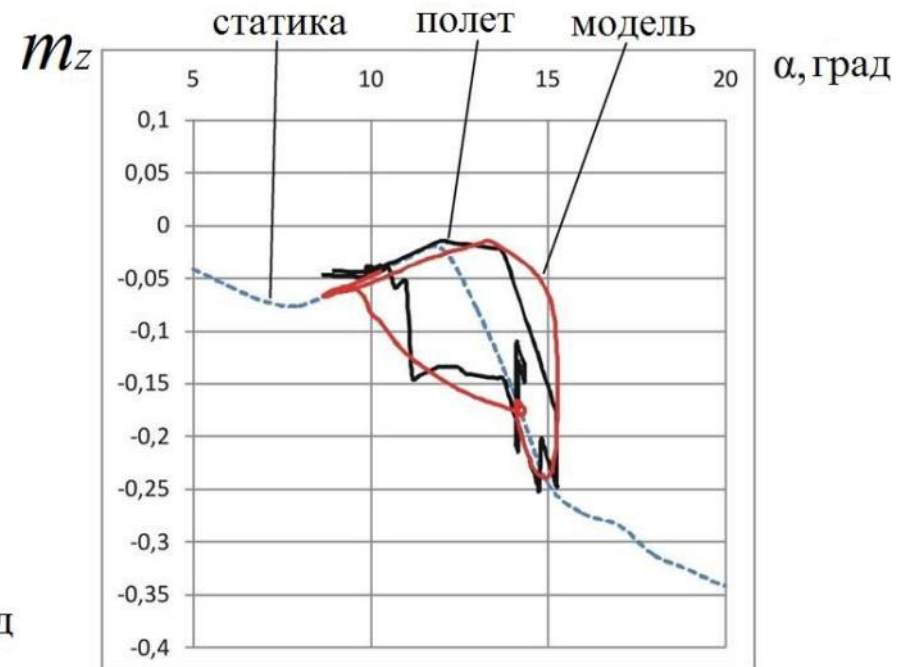
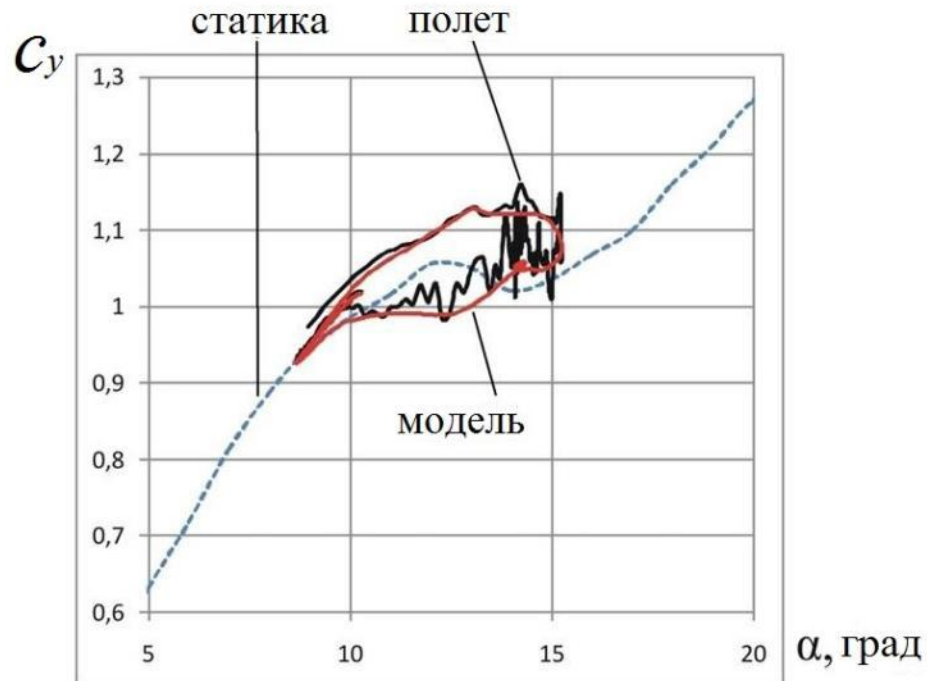
$f = 1 \Gamma \text{ц}$



Сравнение расчётов с лётными испытаниями

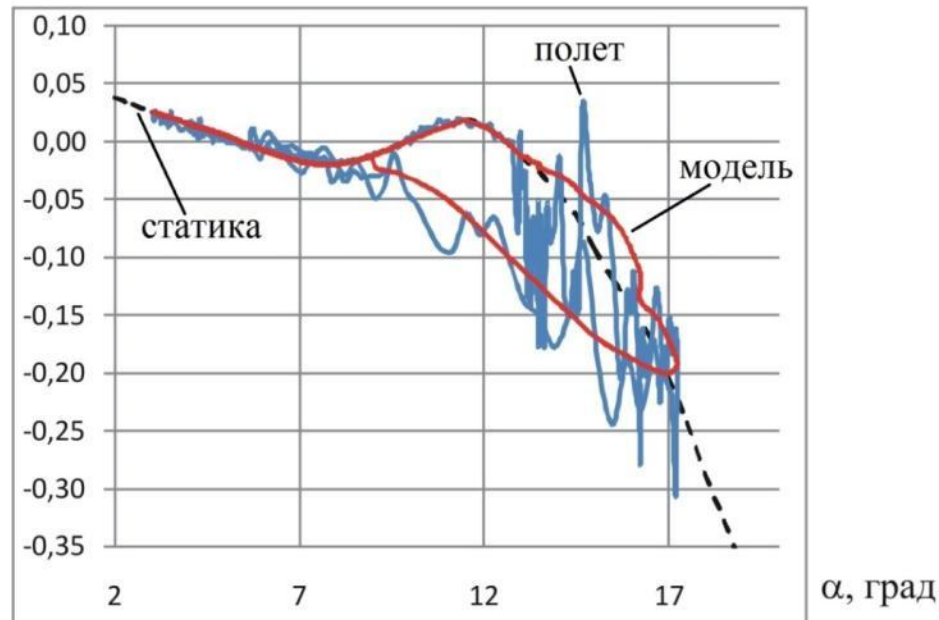
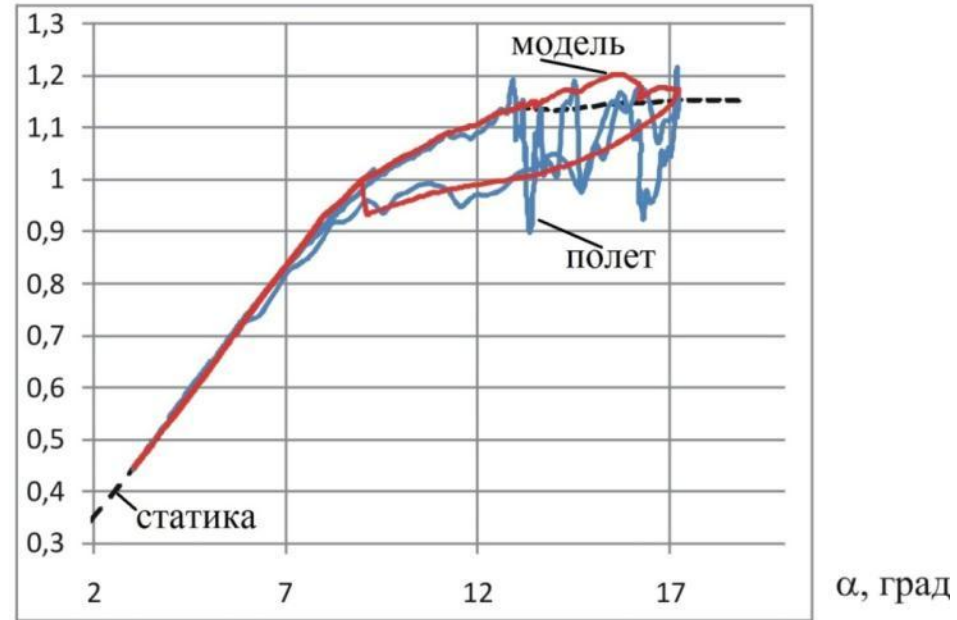
Крейсерская конфигурация Ступенчатое отклонение руля высоты

$M=0.35$



Сравнение расчётов с лётными испытаниями

Крейсерская конфигурация Торможение

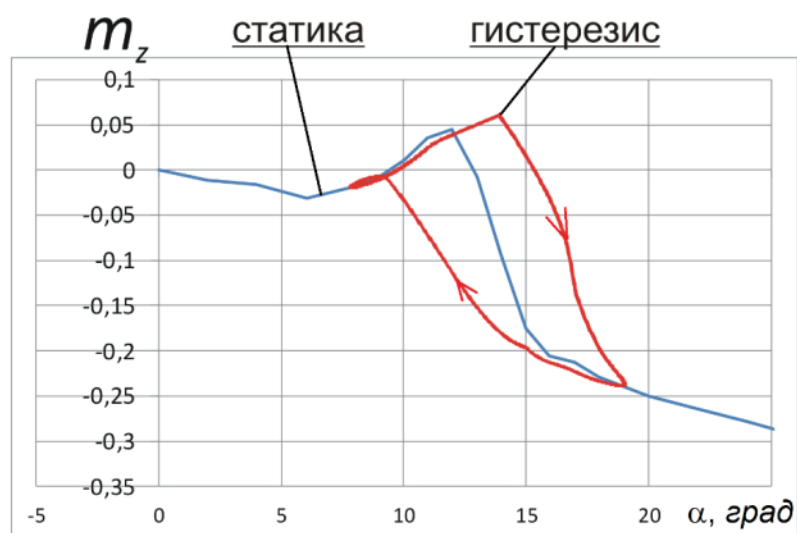
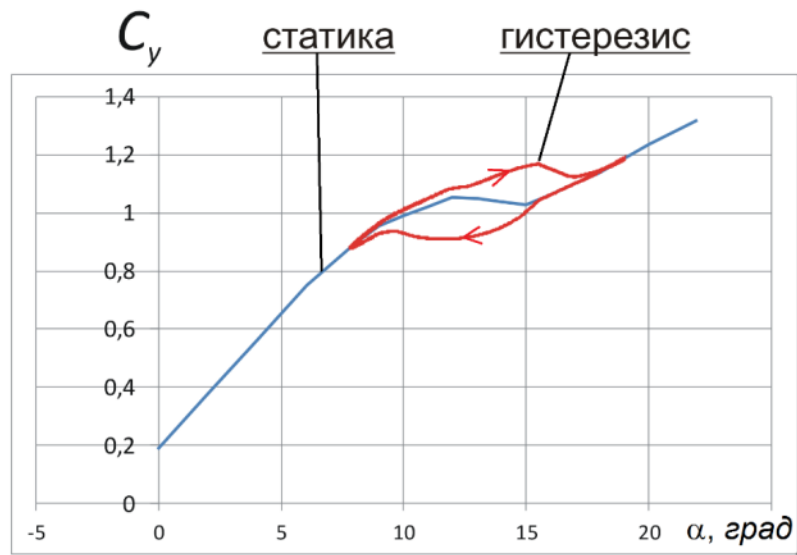
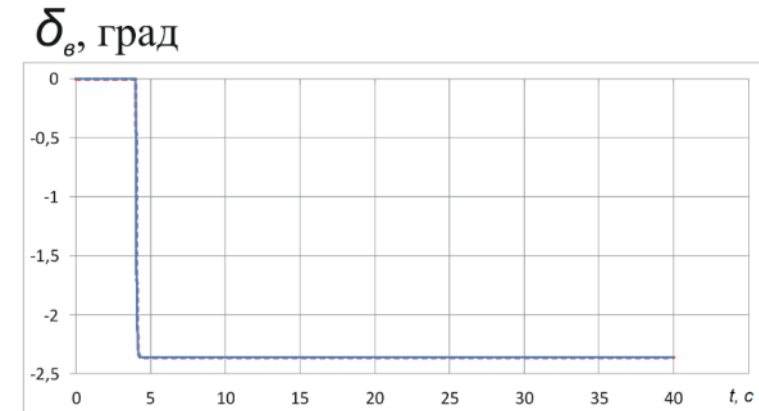
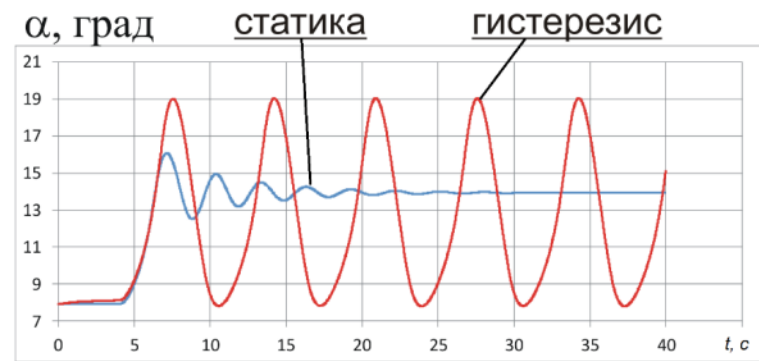
 m_z  C_y 

Особенности динамики самолёта на БУА

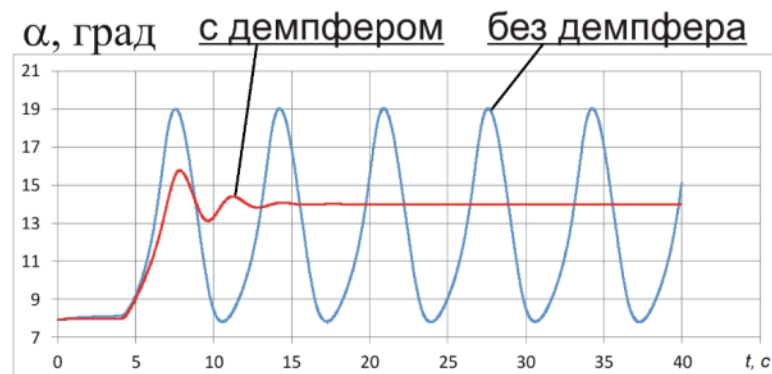
$\alpha = 14^\circ$

Крейсерская конфигурация

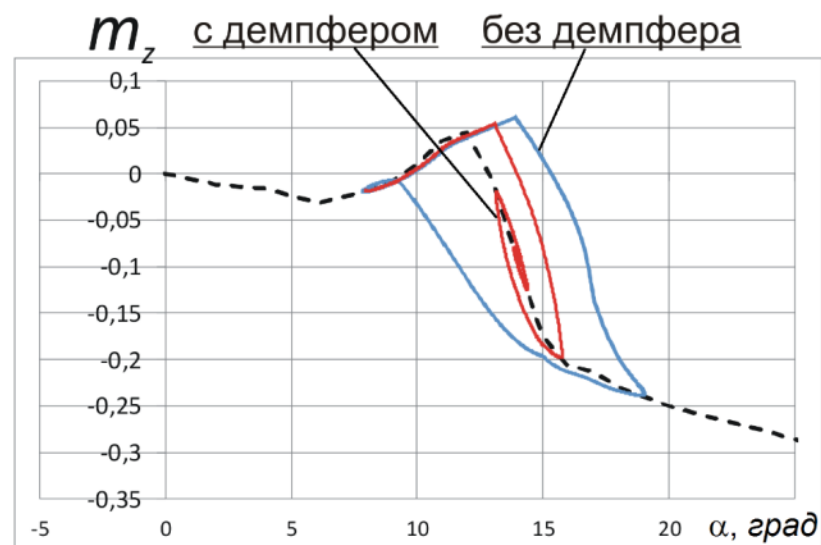
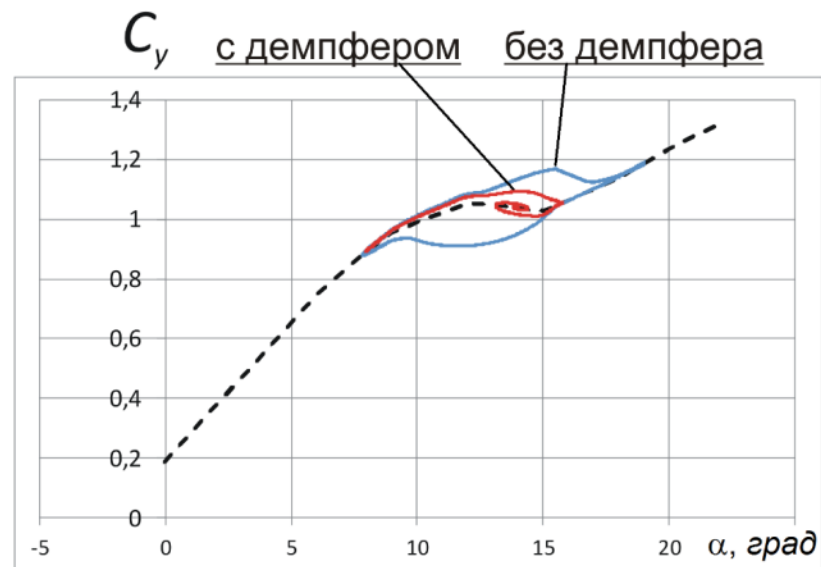
$M = 0.3$



Влияние СУУ

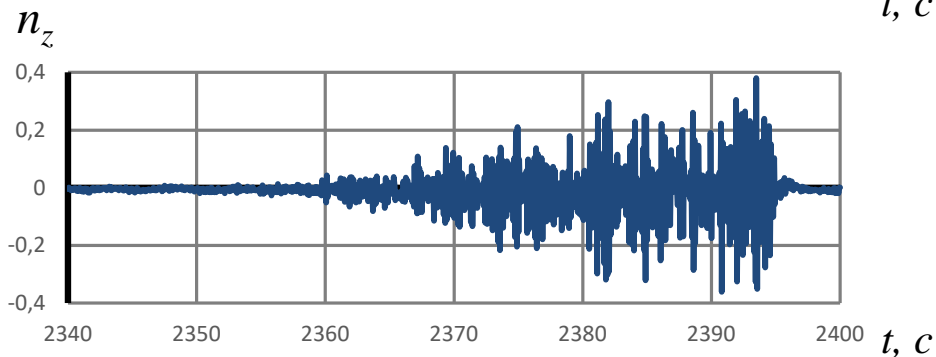
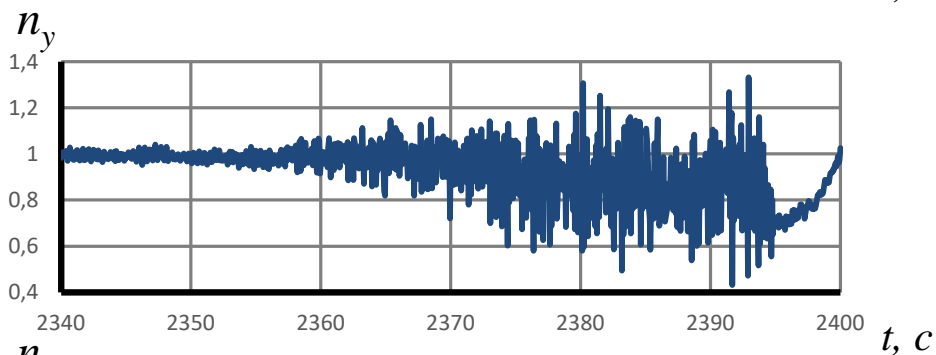
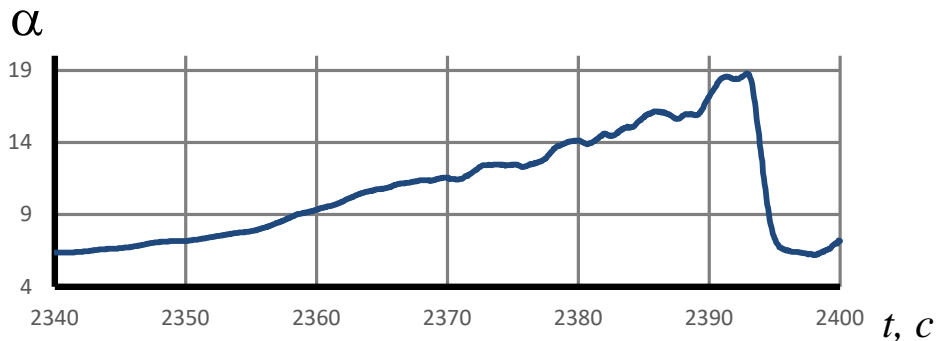


$\alpha_{уст} = 14^\circ$



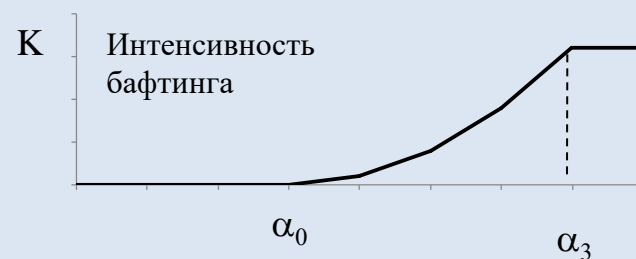
Аэродинамическая тряска

Лётные испытания. Режим торможения.



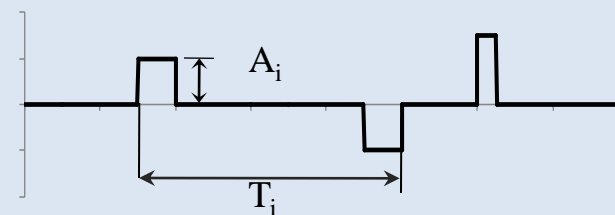
Модель

Бафтинг



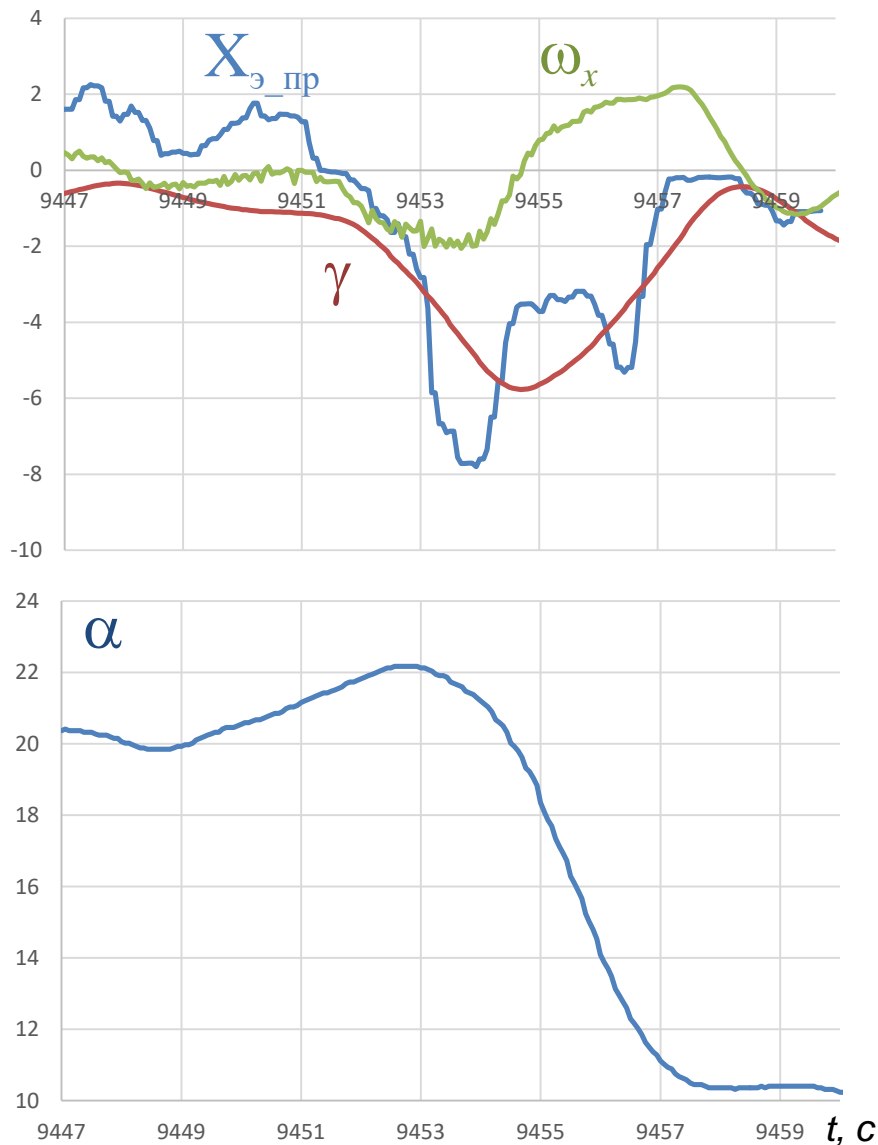
$$\alpha_0, \alpha_3 = f(M, \text{закрылки}, \dots)$$

Дискретный периодичный вход



$$A_i, T_i = f(M, \text{закрылки}, \dots)$$

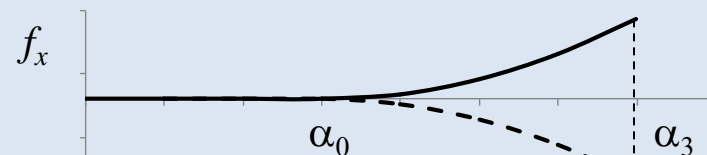
Несимметричный срыв в канале крена



Модель

$$m_x$$

Несимметричный срыв потока

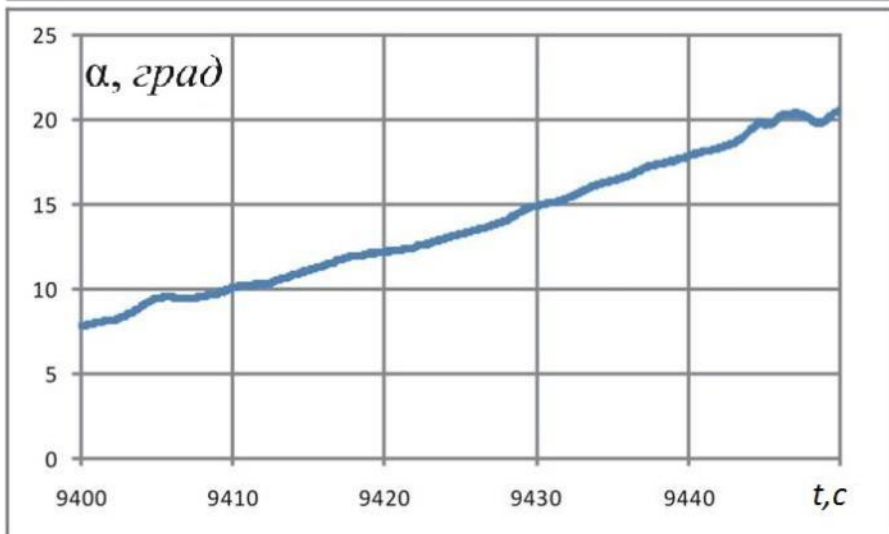
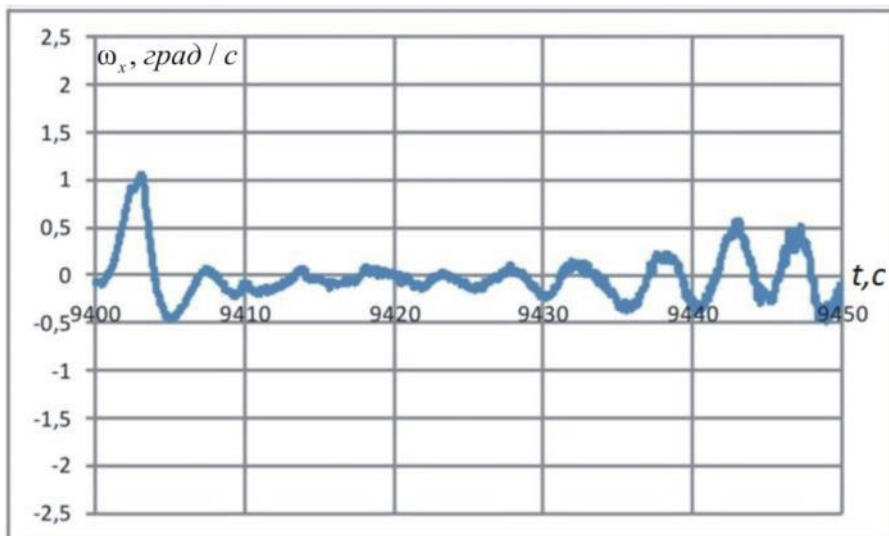


$$\Delta m_x = K_r \cdot f_x$$

$$f_x = f(\alpha, M, \text{закрылки}, \dots)$$

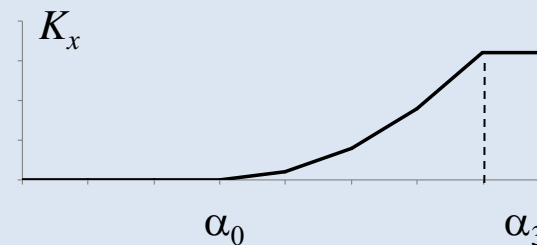
$K_r = \pm 1$ выбирается случайно

Возмущения в канале крена



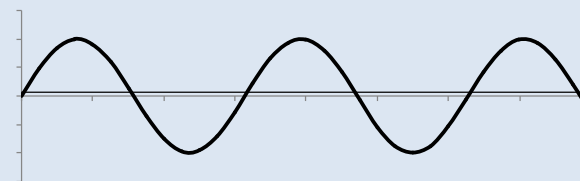
Модель

Бафтинг



$$\Delta m_x = K_x \cdot \Delta f_x$$

Периодические возмущения



$$\Delta m_x = K_{x\omega} \cdot \sin \omega t$$

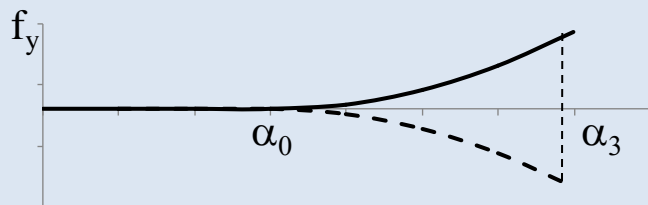
$$K_{x\omega} = f(\alpha, M, \text{закрылки}, \dots)$$

Возмущения в канале рысканья

Модель

Несимметричный отрыв потока

m_y

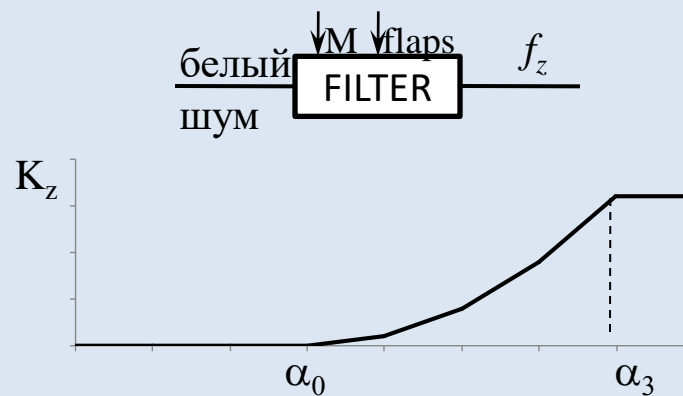


$$\Delta m_y = K_r \cdot f_y$$

$$f_y = f(\alpha, M, \text{закрылки}, \dots)$$

Бафтинг

C_z

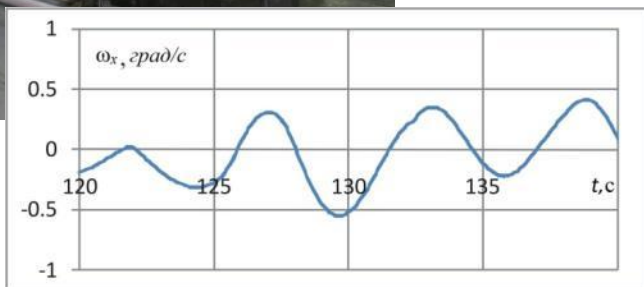
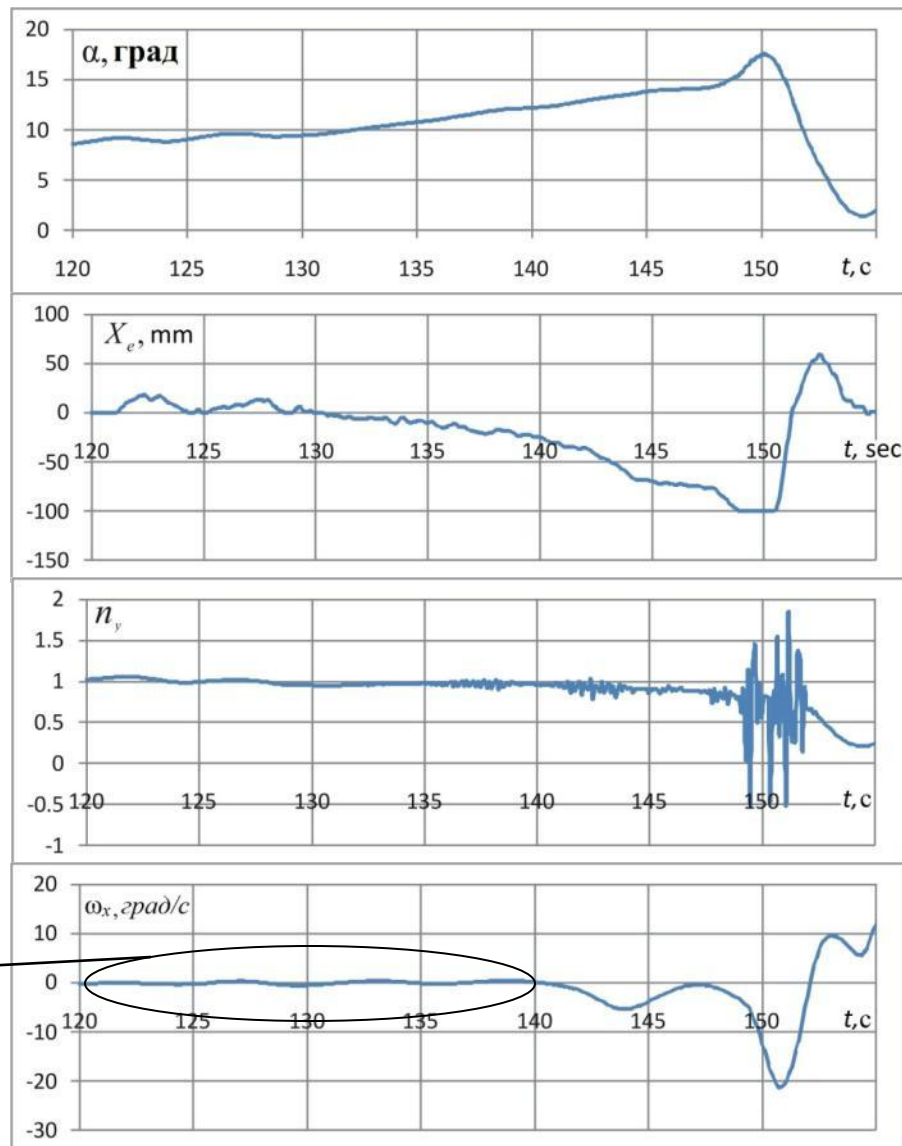


$$\Delta C_z = K_z \cdot f_z$$

$$K_z = f(\alpha, M, \text{flaps}, \dots)$$

Моделирование динамики на ПСПК-102

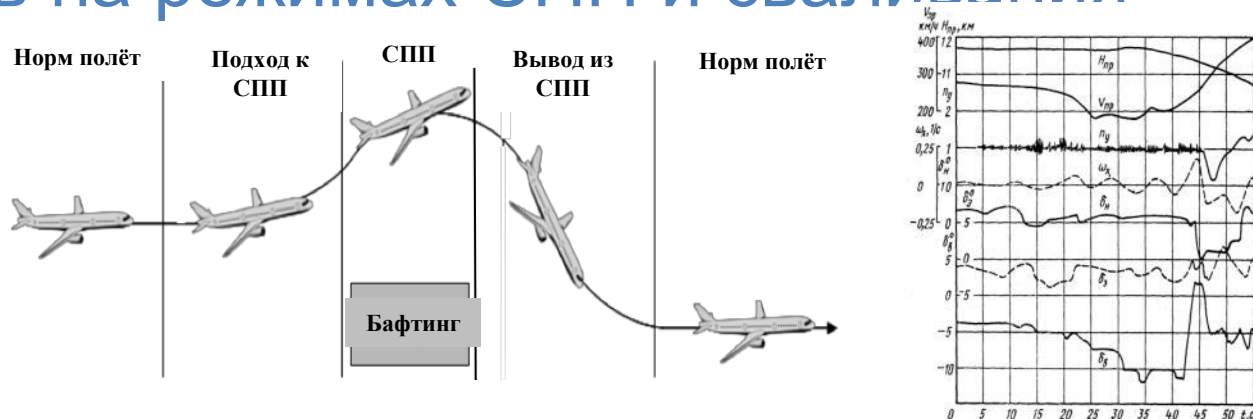
ПСПК-102



Выводы

- Разработана модель аэродинамических характеристик, отражающая поведение самолета на больших углах атаки: гистерезис, бафтинг, несимметричный срыв потока и другие возмущения
- Разработана математическая модель динамики самолета для расчетных и стендовых исследований
- Расчетные и стендовые исследования подтвердили корректность созданной модели. Летчики фирм «Иркут», «ЛИИ», «ГСС», «ГосНИИ ГА», «Boeing» подтвердили адекватность модели поведению реального самолета

Влияние подвижности тренажёров при тренировке пилотов на режимах СПП и сваливания



Параметры до сваливания

Степень свободы	Величина	Частота (рад/с)
Вертикальная	-	-
Продольная	-	-
Боковая	-	-
Крен	5 deg/s	1.0-1.5
Тангаж	1 deg/s	1.0-2.0
Рыскание	1 deg/s	1.0-3.0

Параметры при попадании и выводе из СПП

Степень свободы	Величина	Частота (рад/с)
Вертикальная	3.0 g	<0.2
Продольная	0.15 g	<0.2
Боковая	0.2 g	1.0-2.0
Крен	40 deg/s	1.0-2.0
Тангаж	20 deg/s	1.0-2.0
Рыскание	10 deg/s	1.0

Роль ускорений в различных задачах пилотирования



Сценарии СПП/сваливания: до сваливания – задача стабилизации
после сваливания – маневрирование

Эксперимент

Гипотеза:

- 1) При моделировании подхода к СПП/сваливанию – все 6 степеней свободы;
- 2) При моделировании вывода самолета из СПП/сваливания – достаточно воспроизводить только аэродинамический бафтинг.

ЦАГИ ПСПК-102



Ход штока 1.8 м

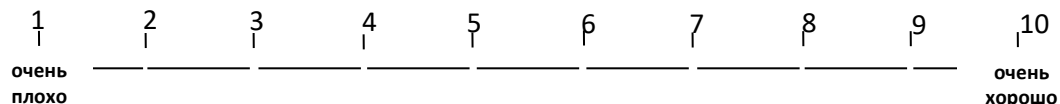
- 4 лётчика-испытателя
- модель гипотетического магистрального самолёта
- сценарии: разворот ветра, порыв, микровзрыв

- неподвижный стенд
- только бафтинг
- полная подвижность

Эксперимент

Критерии оценки:

1) Шкала оценок



2) Вопросник

Вопрос	Ответ		
1. Можно ли обойтись без подвижности?	ДА	НЕТ	Только для первоначального обучения
2. На каком этапе наиболее важна подвижность?	ДО сваливания		ПОСЛЕ сваливания
3. В каком сценарии наиболее важно наличие подвижности?	Разворот ветра	Порывы	Микровзрыв
4. Какая конфигурация подвижности наиболее предпочтительна до сваливания?	Неподв.	Бафтинг	Полная
5. Какая конфигурация подвижности наиболее предпочтительна после сваливания?	Неподв.	Бафтинг	Полная
6. Какая информация помогает лучше распознать наступление сваливания?	Шейкер	Бафтинг	Полная подв.
7. Минимально необходимая подвижность	Неподв.	Бафтинг	Полная

Результаты эксперимента

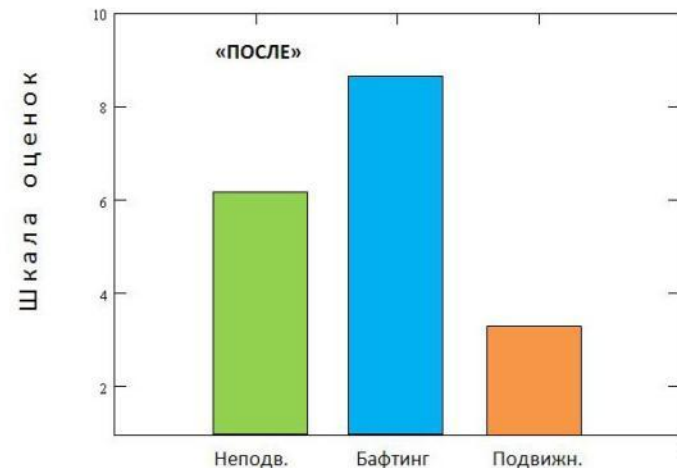
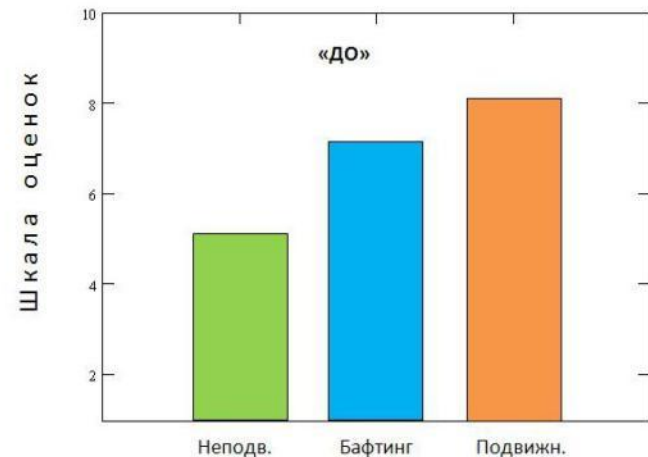
ОПРОСНЫЙ ЛИСТ

1. Оцените по шкале рассматриваемые конфигурации подвижности



2. Ответьте на вопросы анкеты:

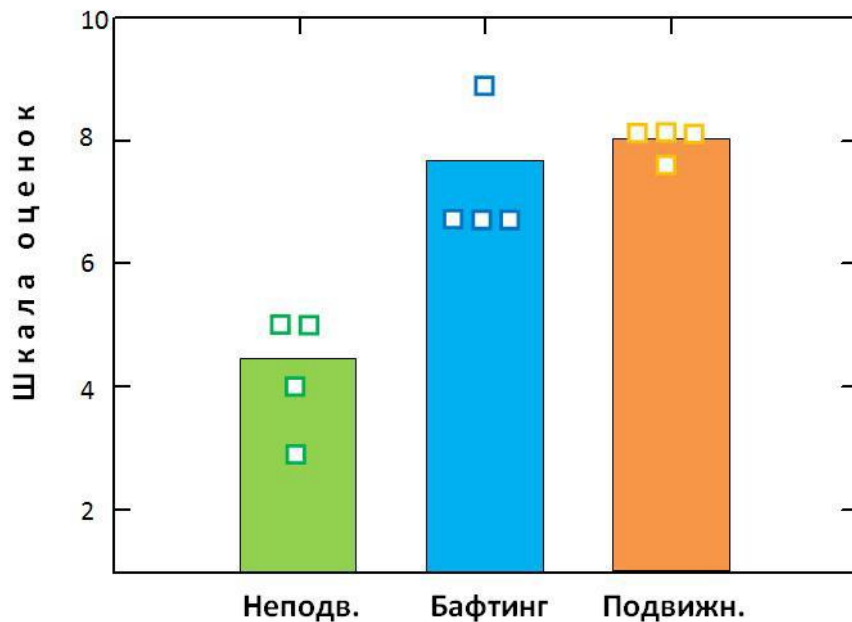
Вопрос	Ответ		
	ДА	НЕТ	
1. Можно ли обойтись без подвижности?			Только для ознакомления с маневром
2. На каком этапе наиболее важна подвижность?	ДО сваливания	ПРИ сваливании	ПОСЛЕ сваливания
3. В каком сценарии наиболее важно наличие подвижности?	Разворот ветра	Порывы	Микровзрыв
4. Какая конфигурация подвижности наиболее предпочтительна до сваливания?	Неподв.	Бафтинг	+ Полная
5. Какая конфигурация подвижности наиболее предпочтительна после сваливания?	Неподв.	Бафтинг	Полная
6. Какая информация помогает лучше распознать наступление сваливания?	Шейкер	+ Бафтинг	Полная подв.
7. Минимально необходимая подвижность	Неподв.	Бафтинг	Полная



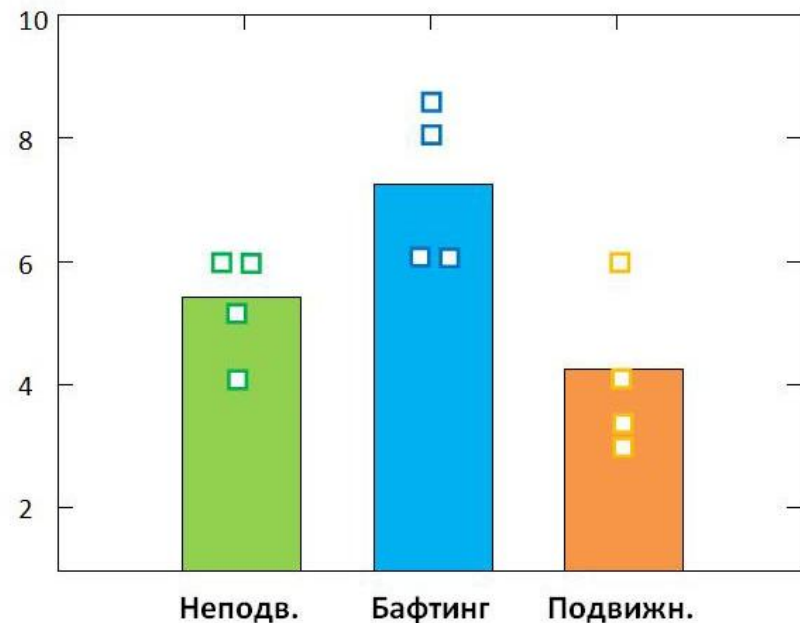
Результаты эксперимента

“Влияние подвижности при моделировании СПП и сваливания”

“До сваливания”



“После сваливания”



Выводы

- Выбор лётчиками варианта системы подвижности, обеспечивающего приемлемое качество моделирования сценариев попадания/вывода самолёта из СПП/сваливания, зависит от этапа сценария: подход к сваливанию или вывод самолёта из сваливания
- Для этапа перед сваливанием наилучшей конфигурацией является полная подвижность, включая бафтинг. Для этапа сваливания и последующего вывода самолёта в горизонт наиболее полезным и информативным сигналом является бафтинг
- Полученные экспериментальные данные согласуются с теоретическим подходом к оценке роли ускорений в пилотировании, разработанном в ЦАГИ ранее