



# Моделирование аэродинамики тестовой конфигурации CRM-NL пассажирского самолета в режиме посадки

А.П. Дубень, Т.К. Козубская, П.В. Родионов

## Мотивация

При решении практических задач валидация математических моделей, численных методов и реализующих их кодов играет ключевую роль.

Несмотря на многообразие доступных валидационных тестов в области вычислительной газовой динамики, количество тестов, приближенных к постановкам практических задач, все еще сравнительно невелико, хотя потребность в них только возрастает. Стоит отметить, что экспериментальные данные для практико-ориентированных тестов часто остаются недоступными широкому кругу исследователей.

В сложившихся условиях особое значение приобретают международные воркшопы, в рамках которых любой желающий может получить доступ к надежным экспериментальным данным, а также частично к численным результатам других авторов. Одним из таких мероприятий является AIAA CFD High Lift Prediction Workshop.

## 4th AIAA CFD High Lift Prediction Workshop

10%-ая модельная геометрия пассажирского самолета Common Research Model (CRM) в конфигурации high lift (с выпущенными предкрылками и закрылками)

Эксперимент проведен в 5-метровой низкоскоростной аэродинамической трубе QinetiQ

Постановка:

$M = 0.2$ ,  $Re = 5.49 \times 10^6$

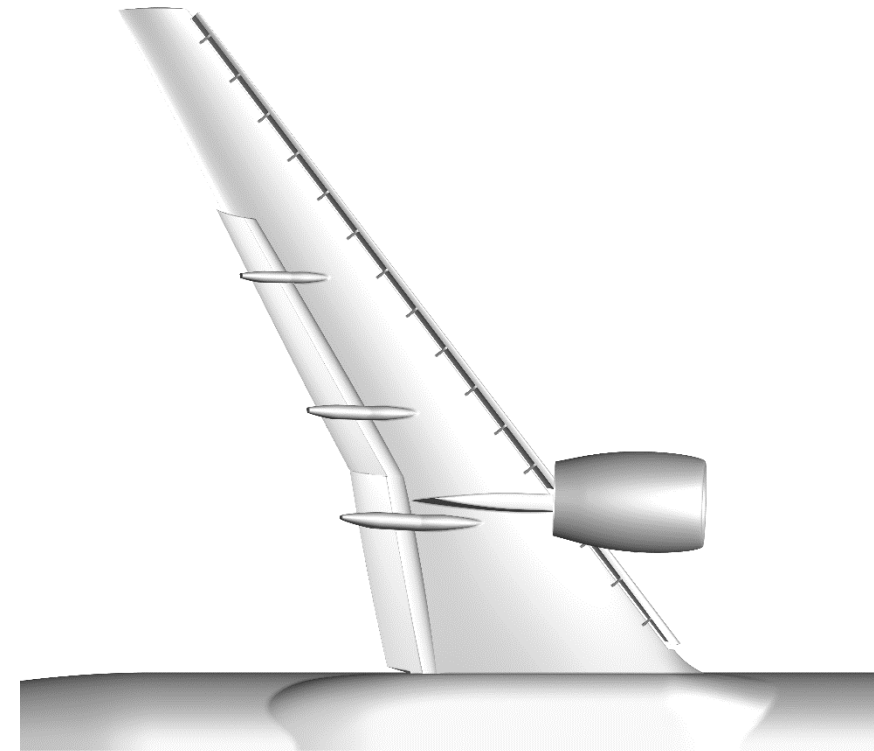
$\alpha = 2.78^\circ - 21.47^\circ$  (corrected)

Доступные данные:

Интегральные характеристики  
 $C_l$ ,  $C_d$ ,  $M_y$

Коэффициент давления в сечениях

Визуализация течения по масляным картинкам и мини-нитям (mini-tufts)



## Вычислительная постановка задачи

Сетки:

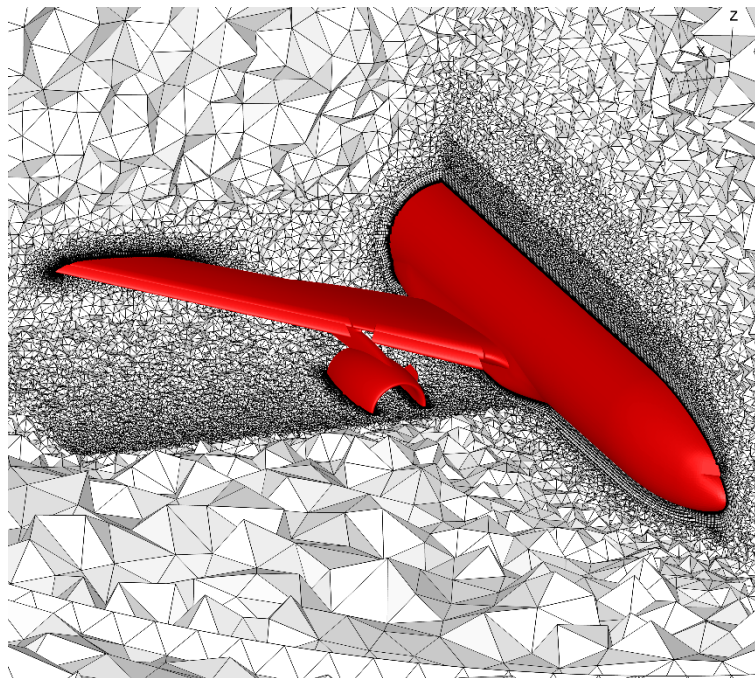
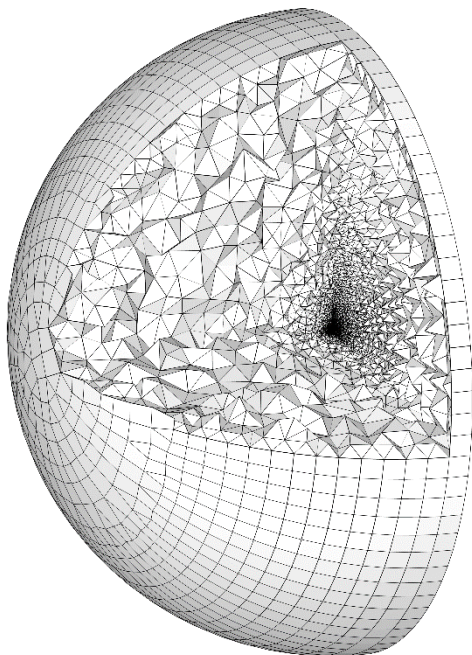
	$N$	$N_{\text{surf}}$
Level A	12 332 217	393 972
Level B	32 303 132	700 270
Level C	91 981 488	1 297 525

Код NOISEtte, RANS SA, схема EBR5

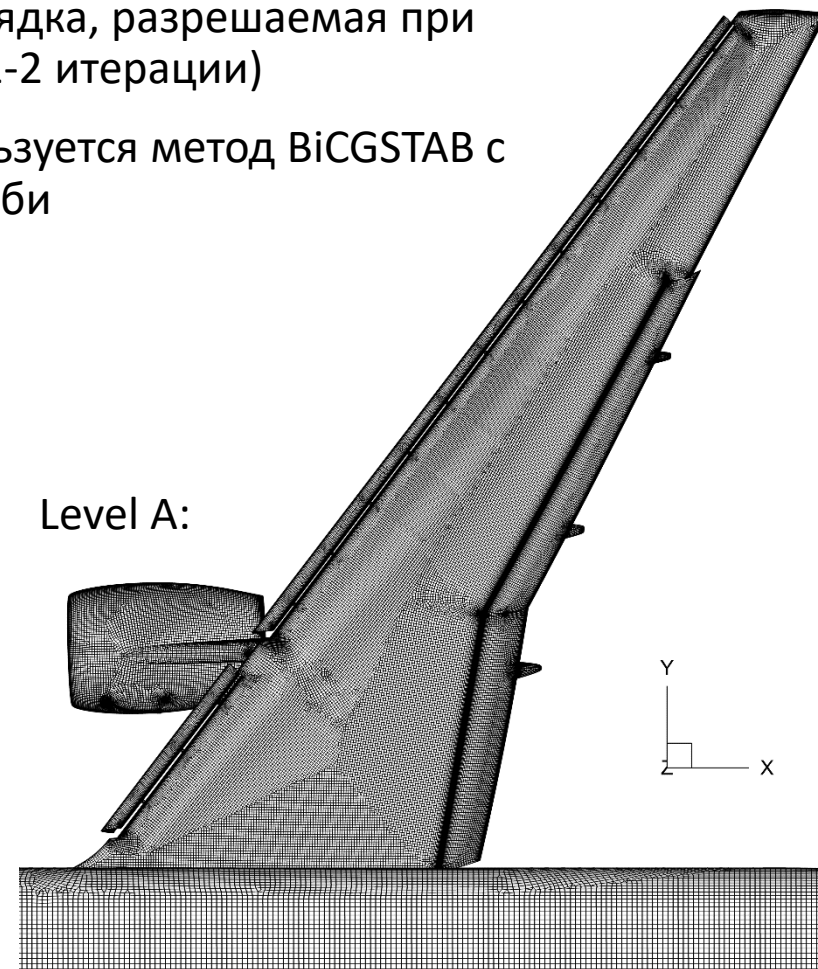
Интегрирование по псевдовремени:  
неявная схема первого порядка, разрешаемая при  
помощи метода Ньютона (1-2 итерации)

На каждой итерации используется метод BiCGSTAB с  
предобуславливателем Якоби

Level A:



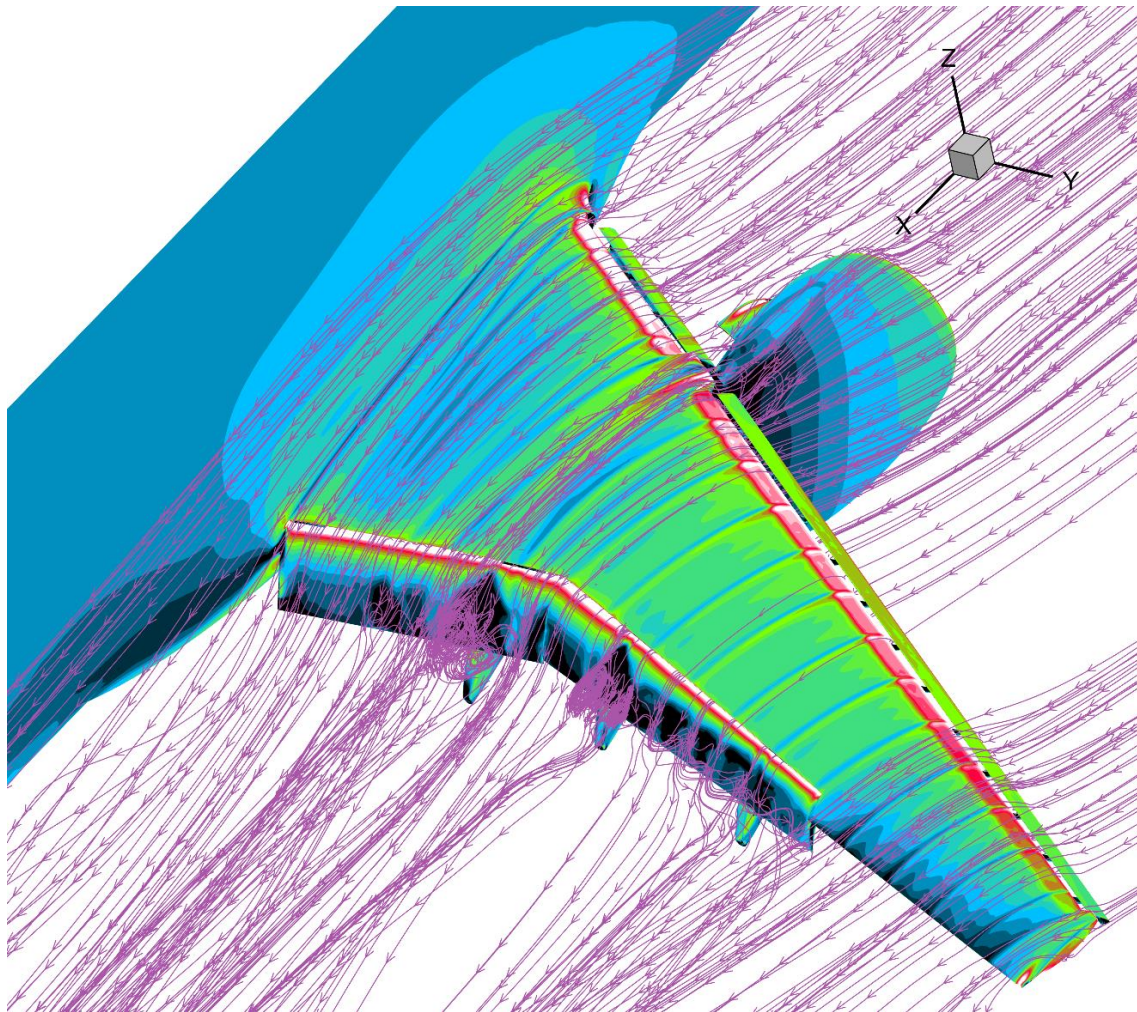
Level A:



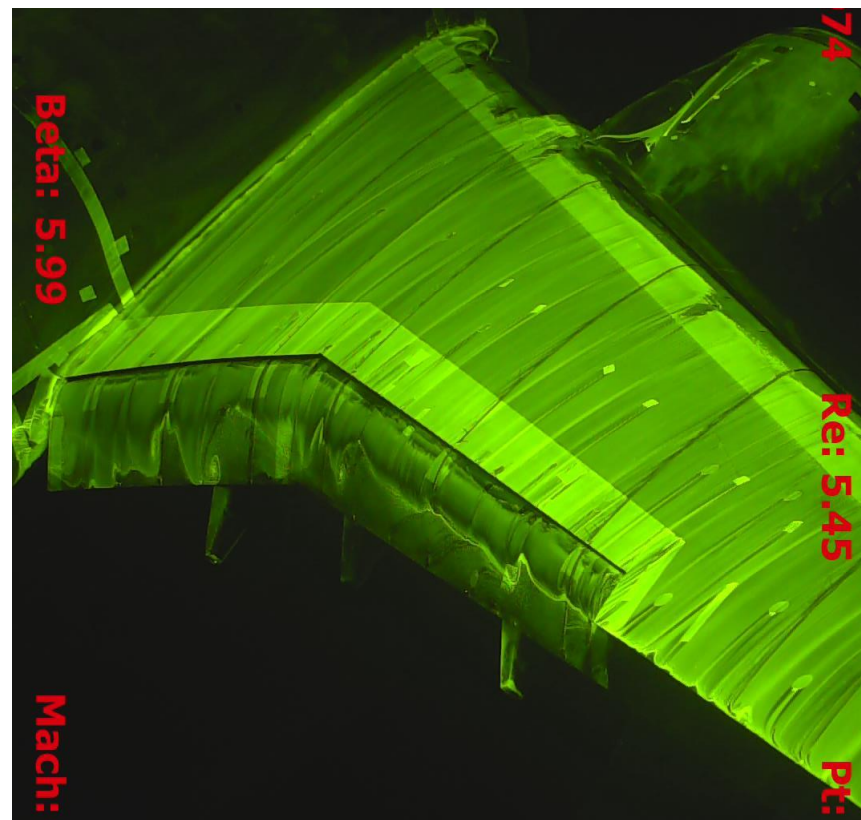


# $\alpha = 7.05^\circ$ : общий вид течения

NOISEtte, Level A:



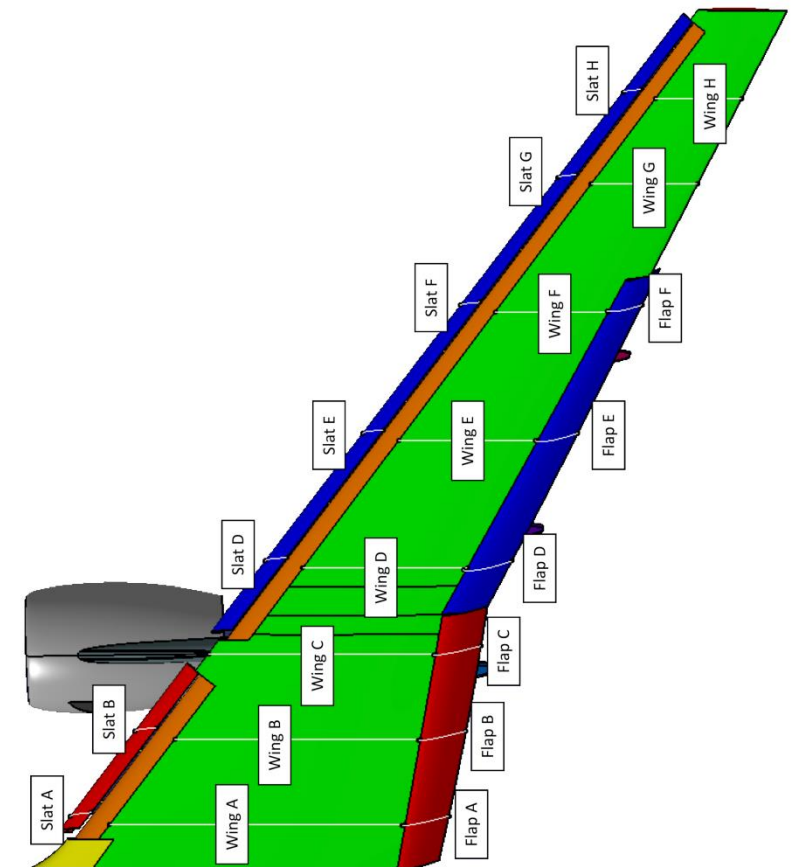
Exp:



$\alpha = 7.05^\circ$ :  
интегральные характеристики

CL	Exp	1.77862	err
	Level A	1.735	2.45%
	Level B	1.764	0.82%
	Level C	1.76	1.05%
CD	Exp	0.18671	err
	Level A	0.1785	4.40%
	Level B	0.183	1.99%
	Level C	0.1835	1.72%
MY	Exp	-0.3706	err
	Level A	-0.333	10.15%
	Level B	-0.354	4.48%
	Level C	-0.35	5.56%

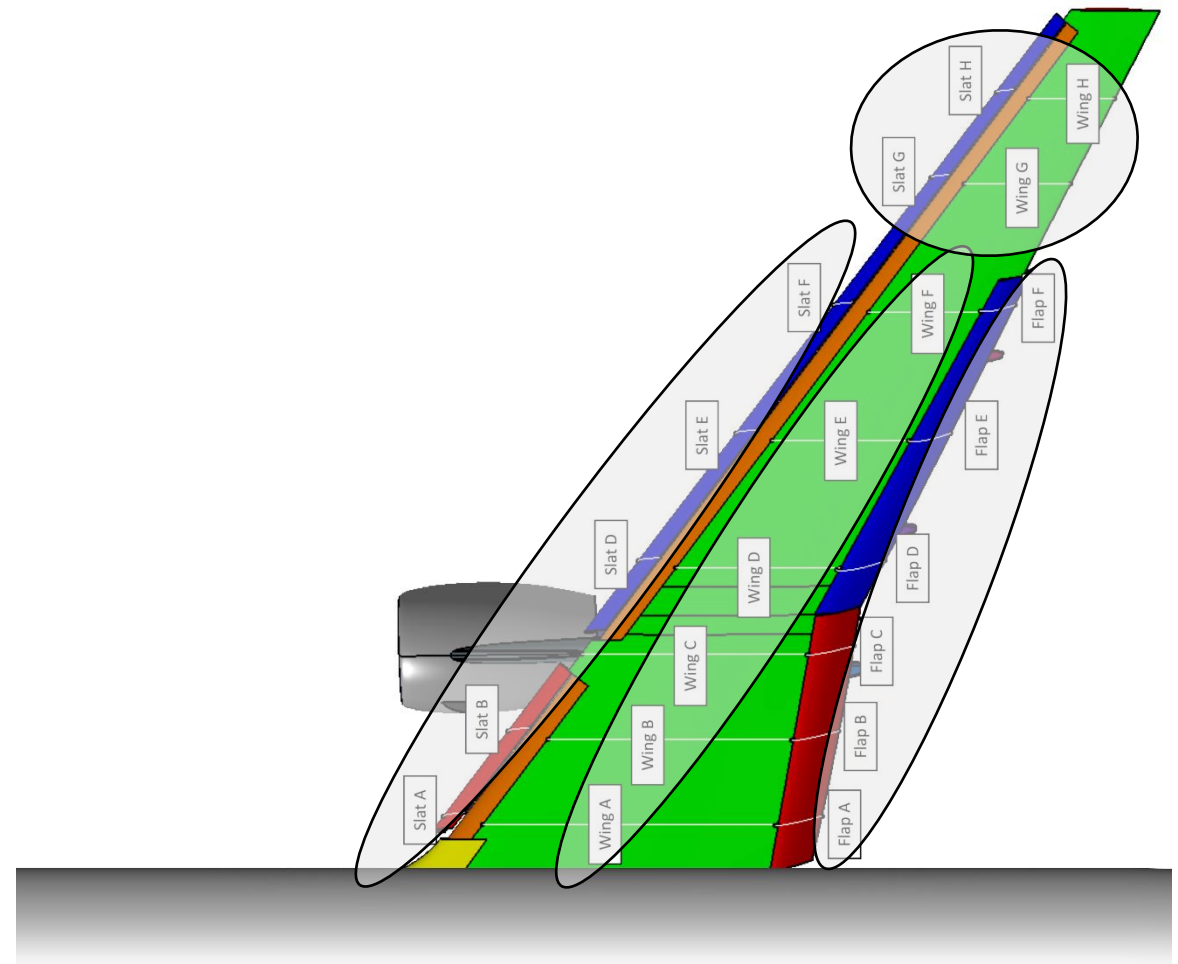
Измерение давления в сечениях



$\alpha = 7.05^\circ$ :  
интегральные характеристики

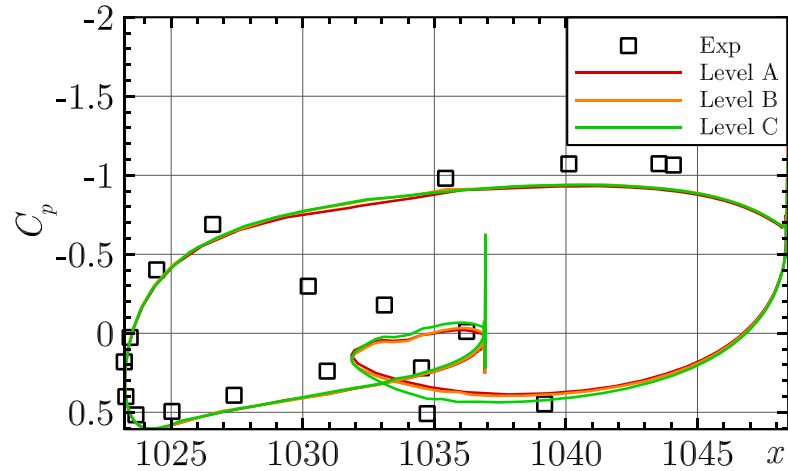
CL	Exp	1.77862	err
	Level A	1.735	2.45%
	Level B	1.764	0.82%
	Level C	1.76	1.05%
CD	Exp	0.18671	err
	Level A	0.1785	4.40%
	Level B	0.183	1.99%
	Level C	0.1835	1.72%
MY	Exp	-0.3706	err
	Level A	-0.333	10.15%
	Level B	-0.354	4.48%
	Level C	-0.35	5.56%

Измерение давления в сечениях

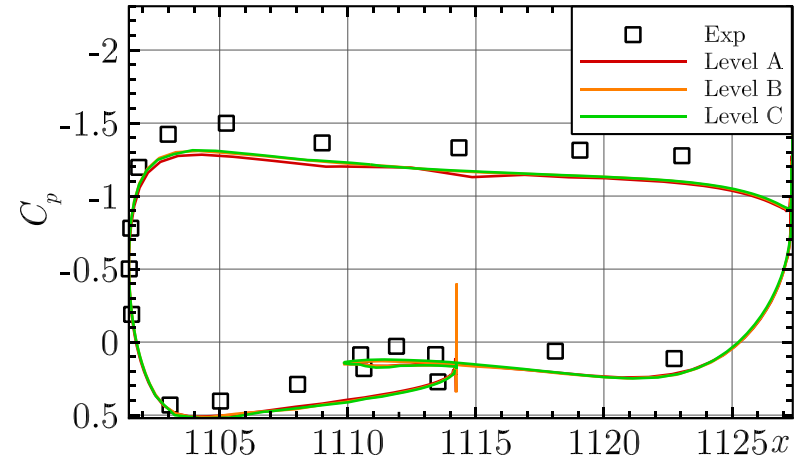


# $\alpha = 7.05^\circ$ : коэффициент давления на предкрылках

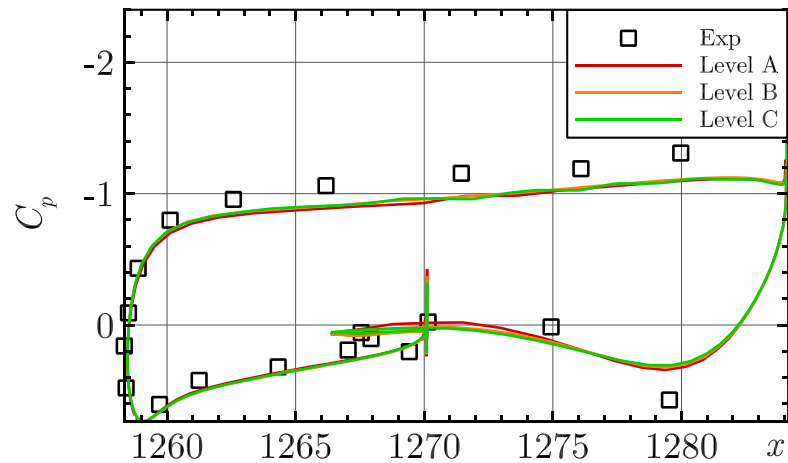
Сечение А



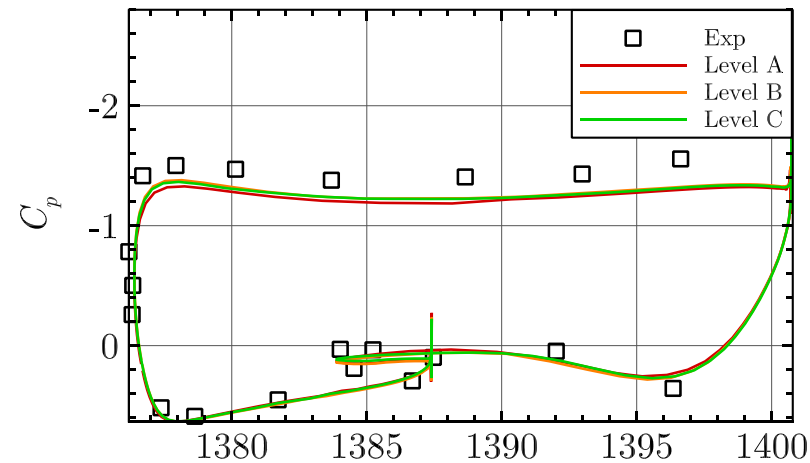
Сечение В



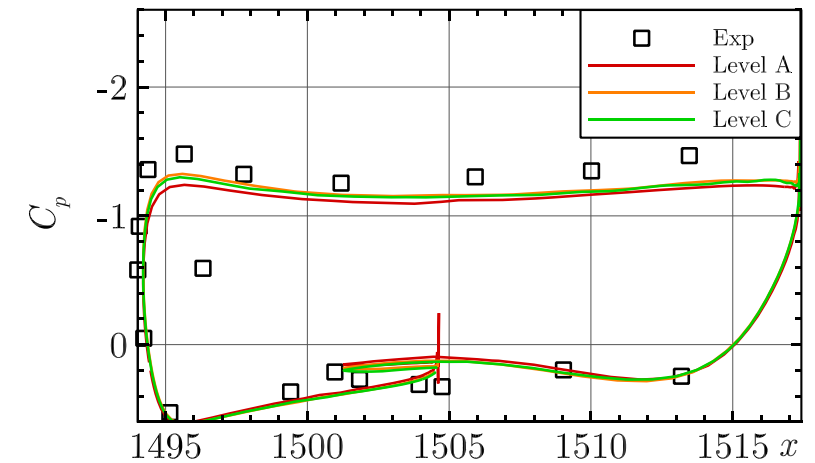
Сечение D



Сечение Е



Сечение F

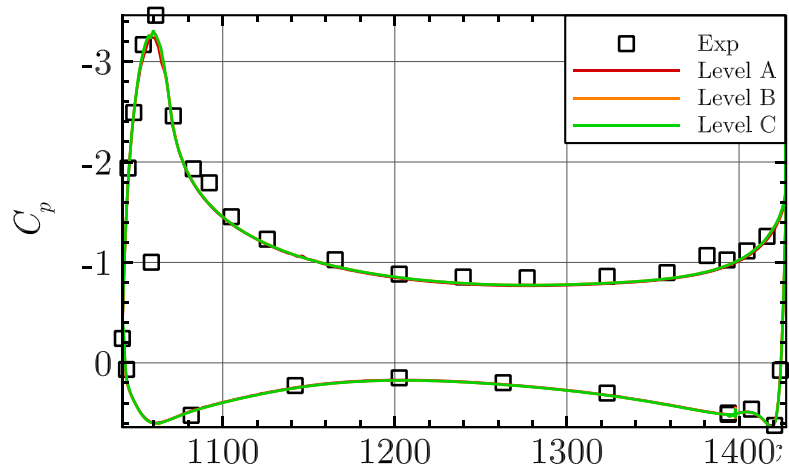




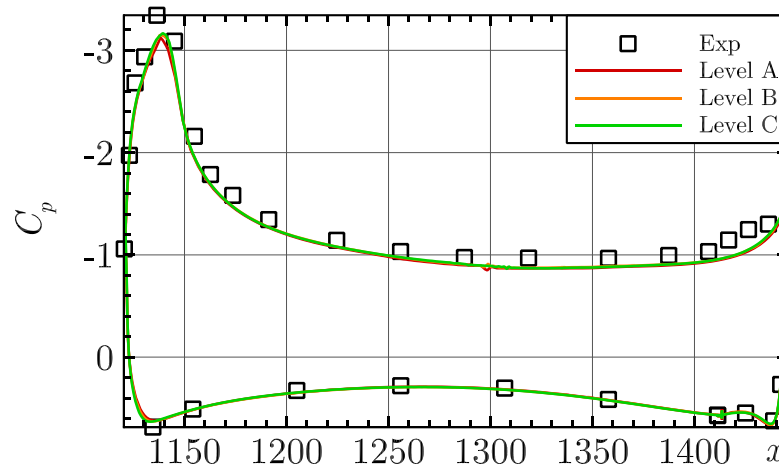


# $\alpha = 7.05^\circ$ : коэффициент давления на крыле

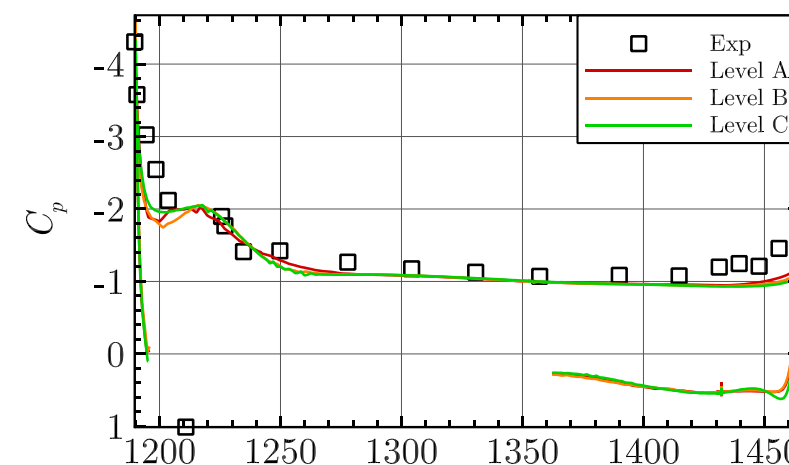
Сечение А



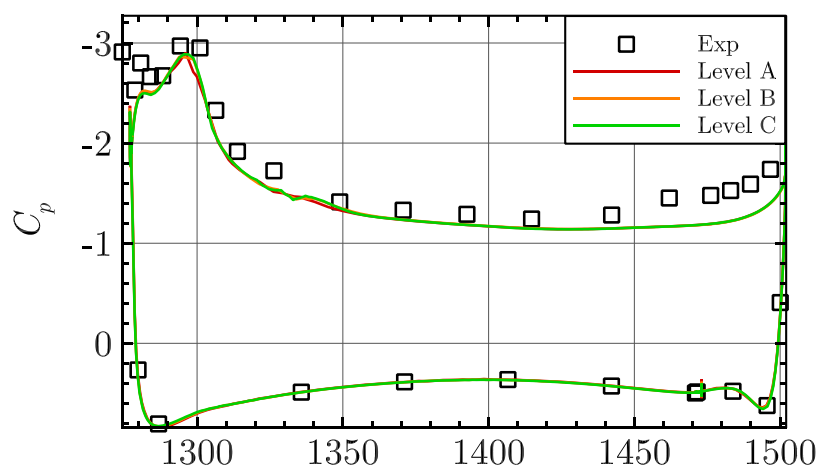
Сечение В



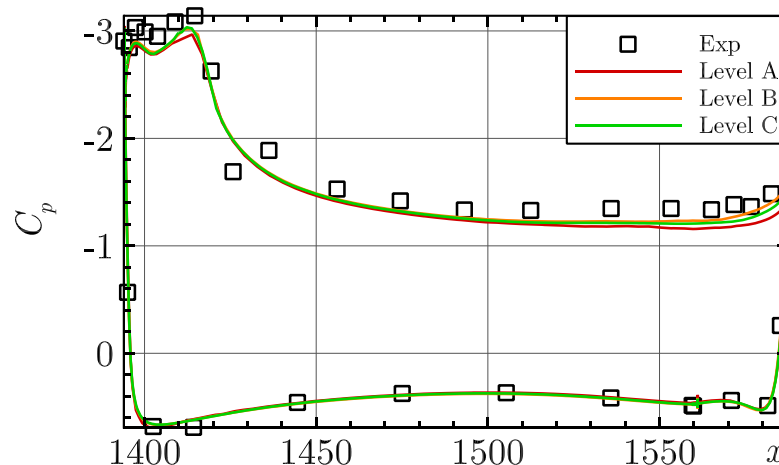
Сечение С



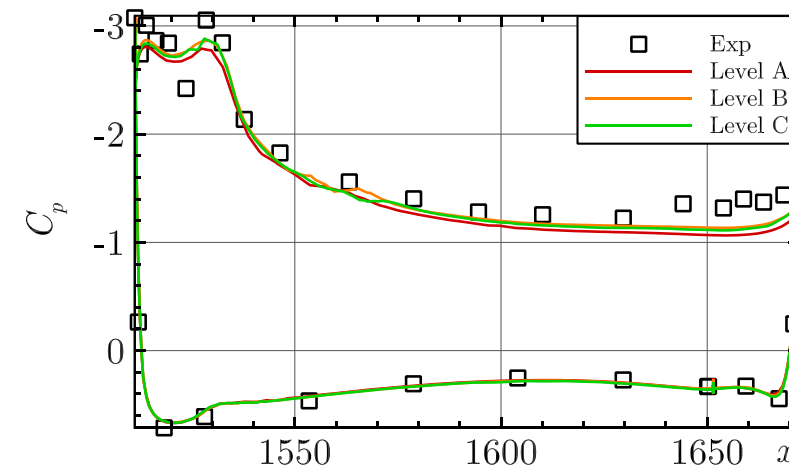
Сечение D



Сечение E



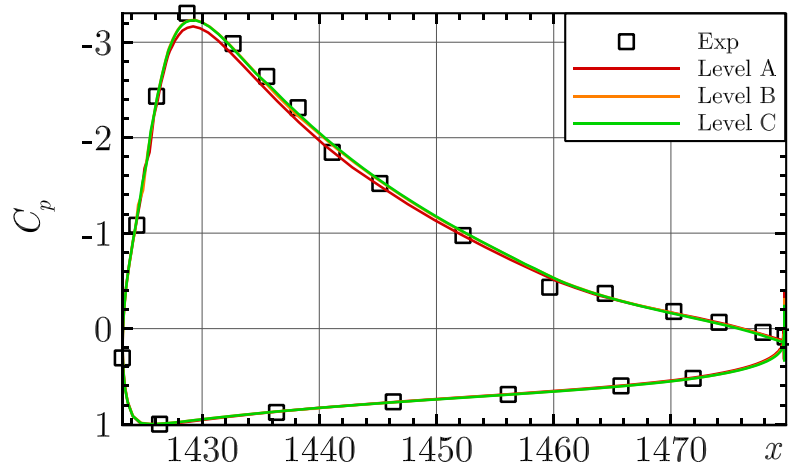
Сечение F



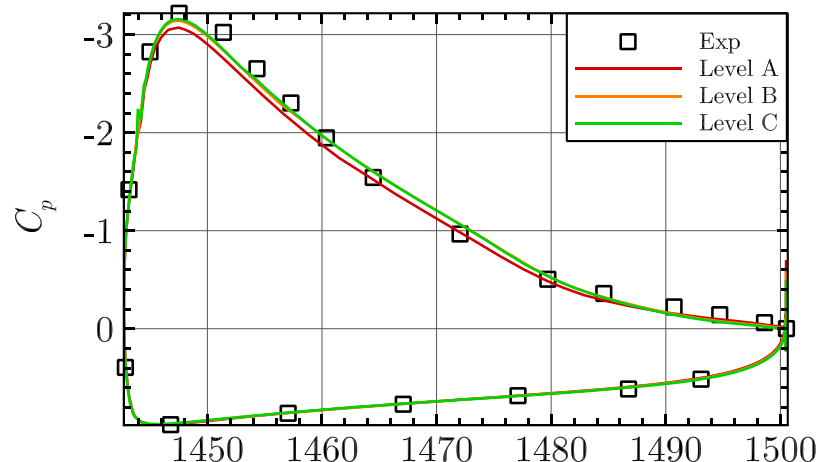


# $\alpha = 7.05^\circ$ : коэффициент давления на закрылках

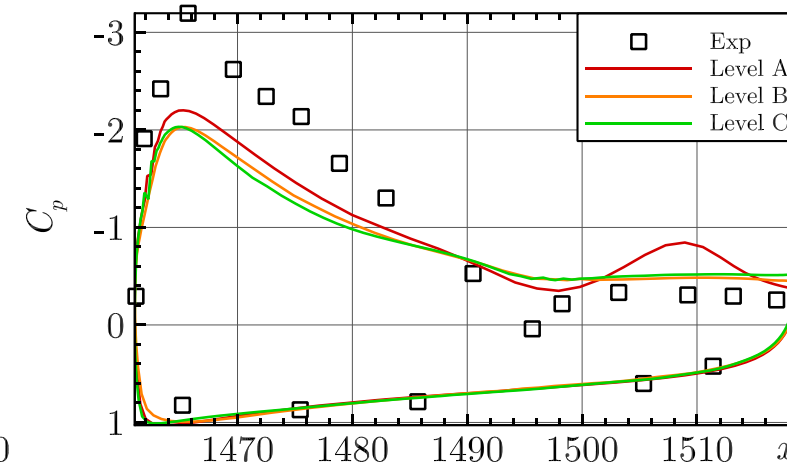
Сечение А



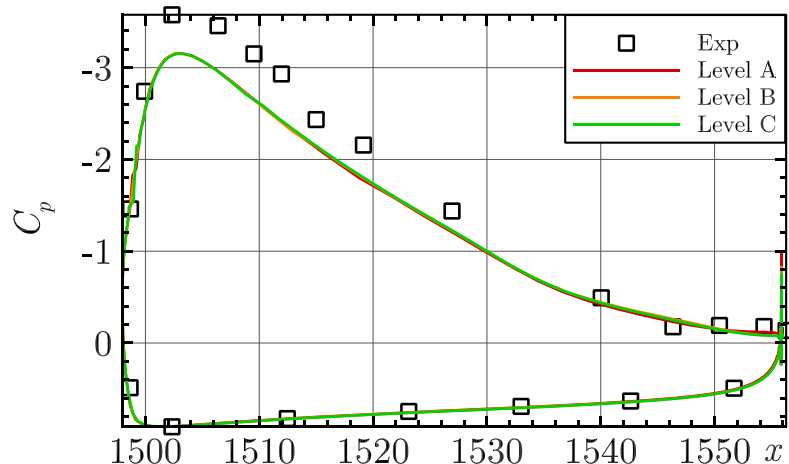
Сечение В



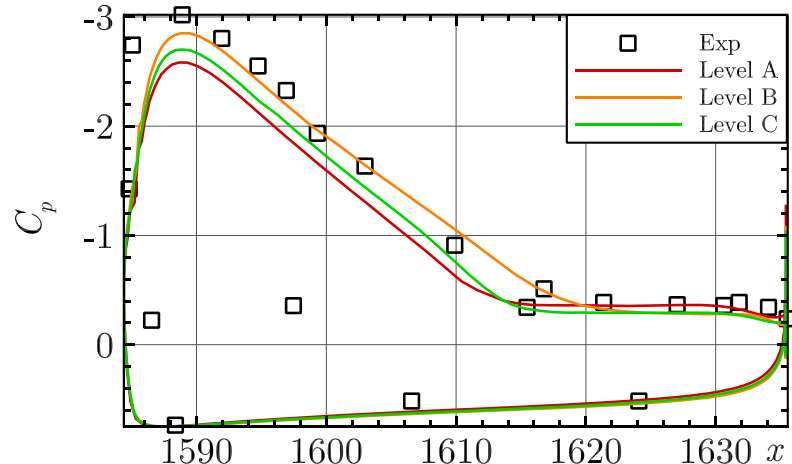
Сечение С



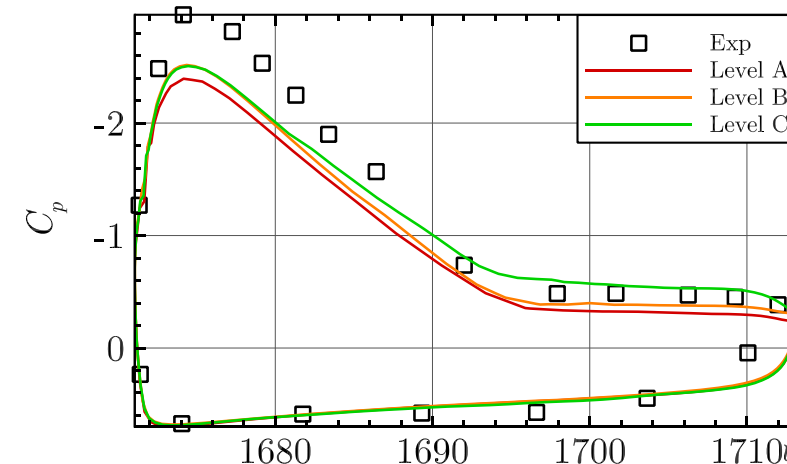
Сечение D



Сечение Е

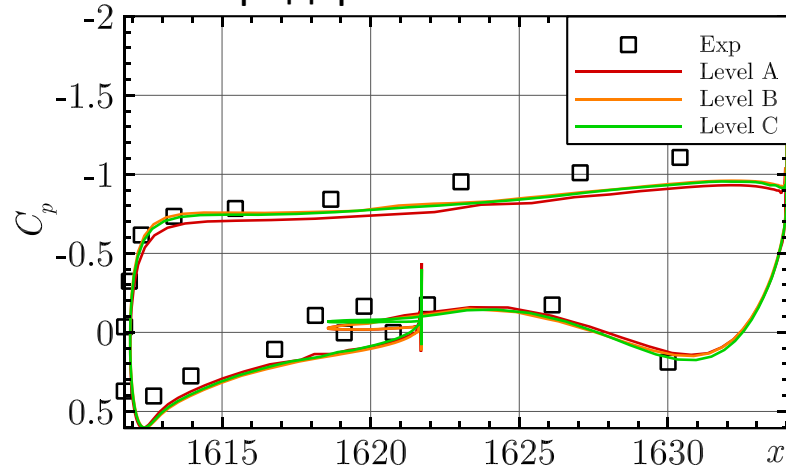


Сечение F

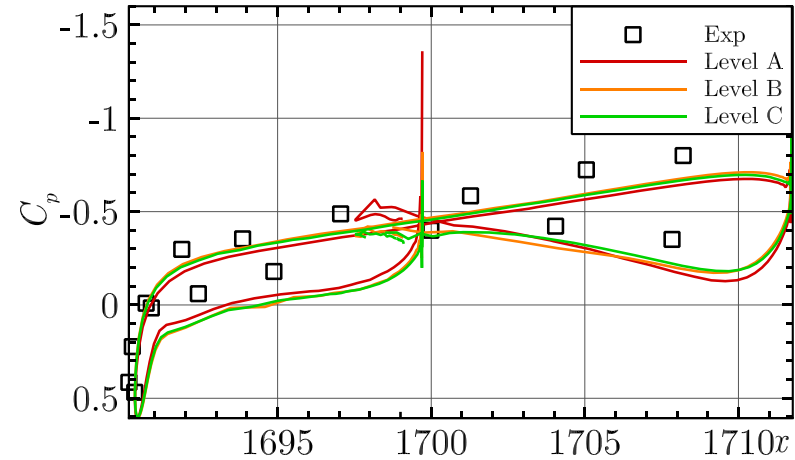


# $\alpha = 7.05^\circ$ : коэффициент давления наблизи законцовки крыла

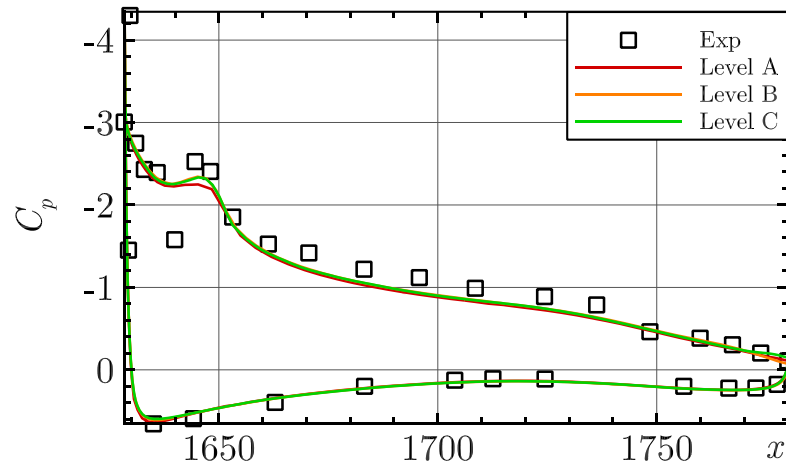
Предкрылок: Сечение G



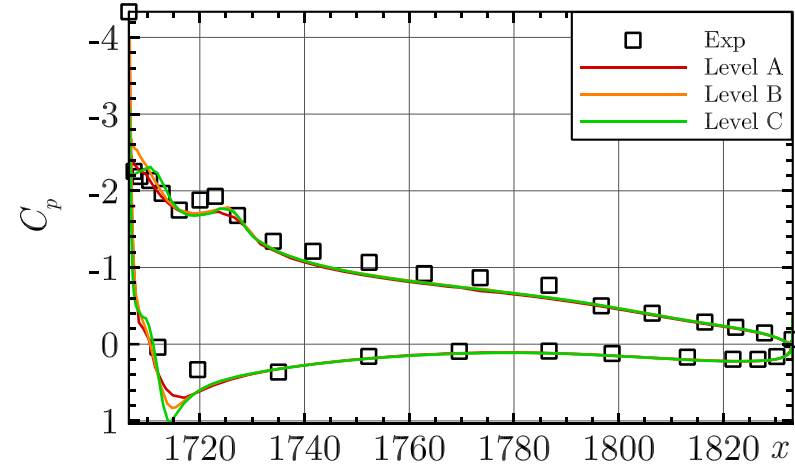
Предкрылок: Сечение H



Крыло: Сечение G



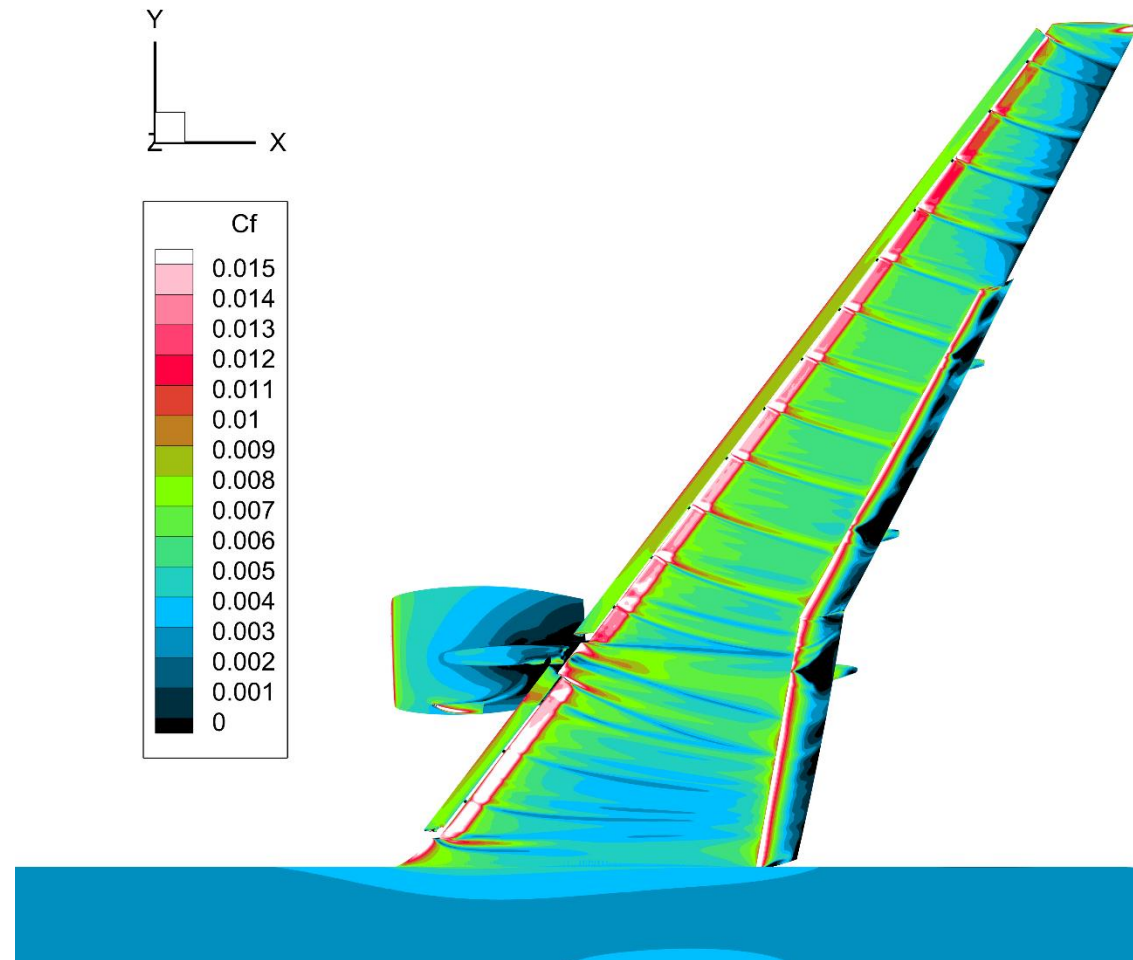
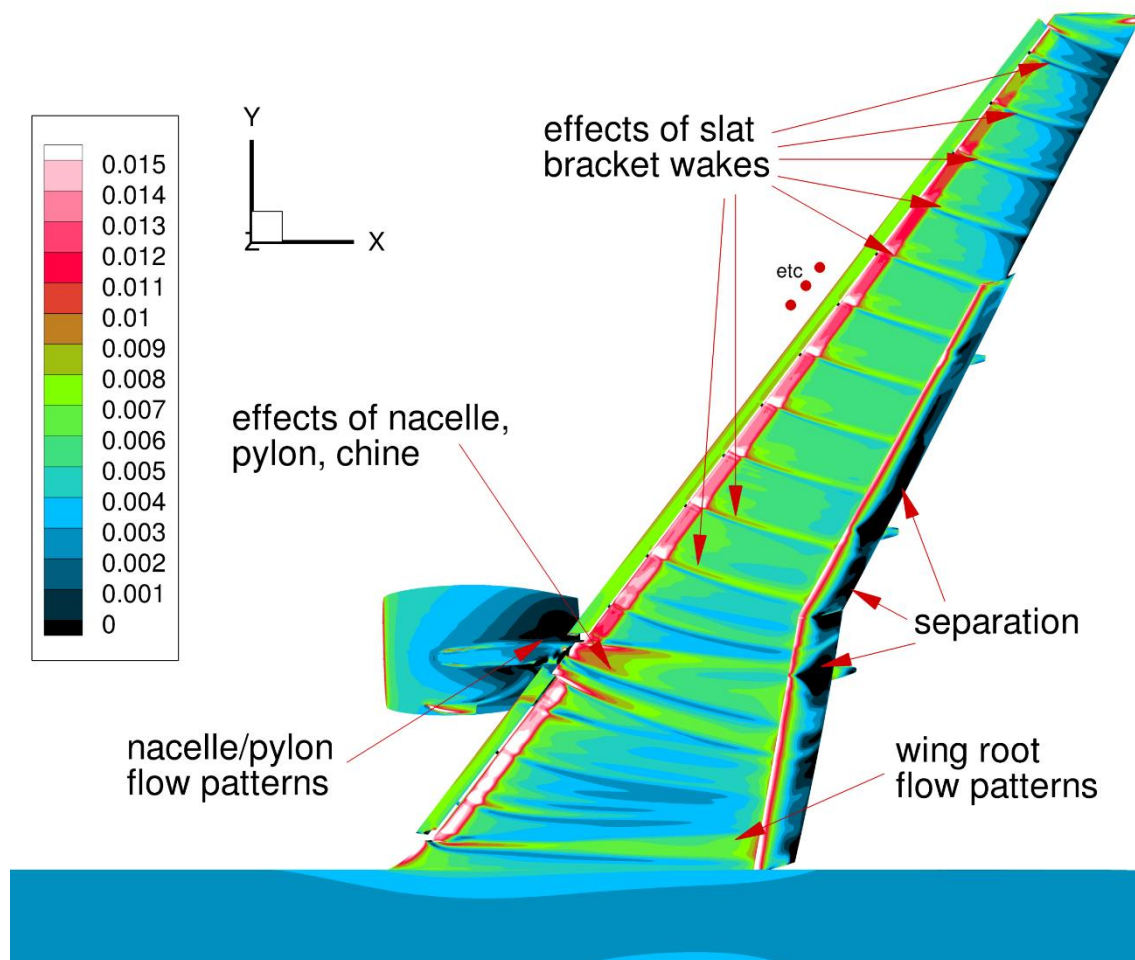
Крыло: Сечение H



# $\alpha = 7.05^\circ$ : коэффициент трения

Пример с сайта воркшопа:

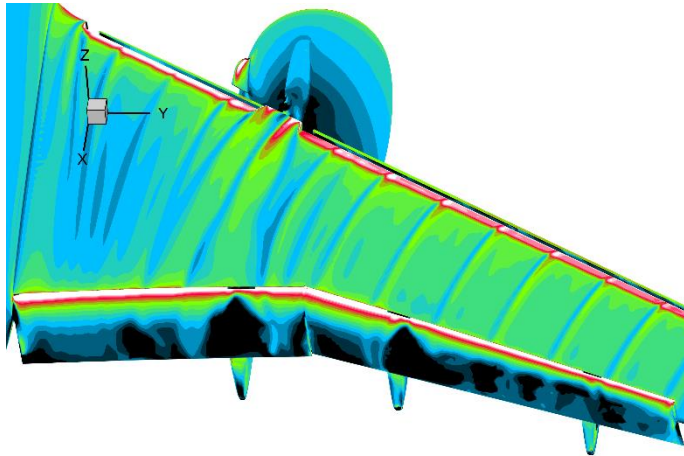
NOISEtte, Level C:



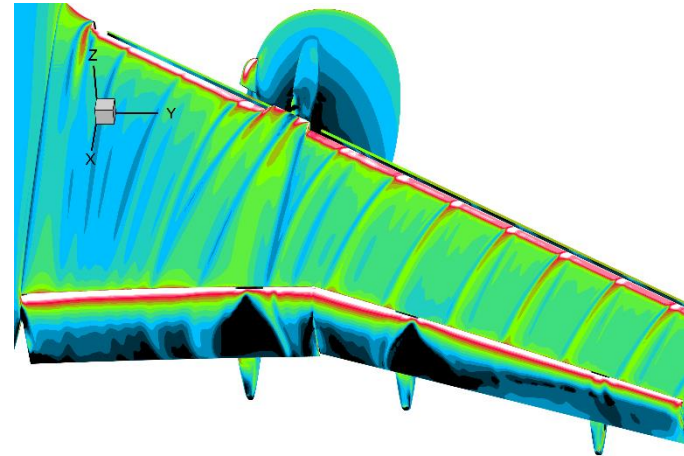


# $\alpha = 7.05^\circ$ : коэффициент трения

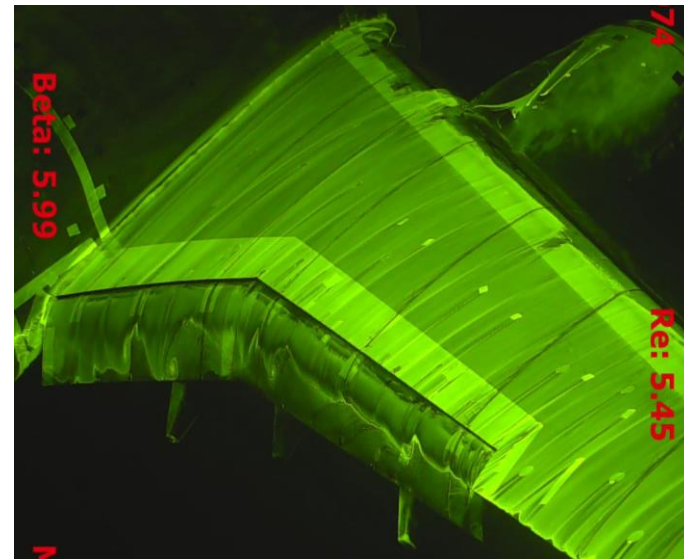
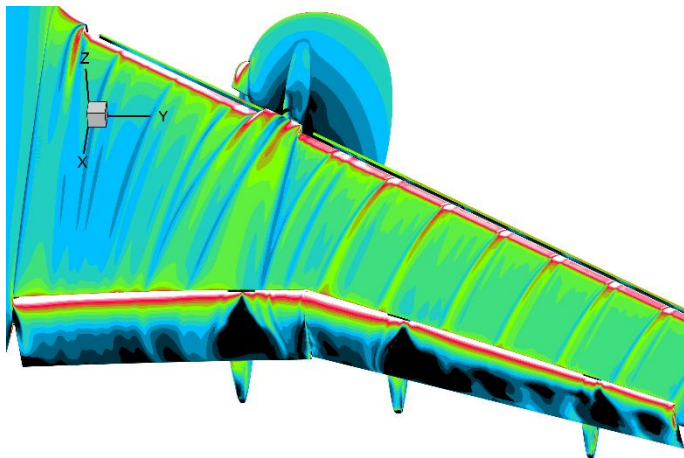
Level A:



Level B:



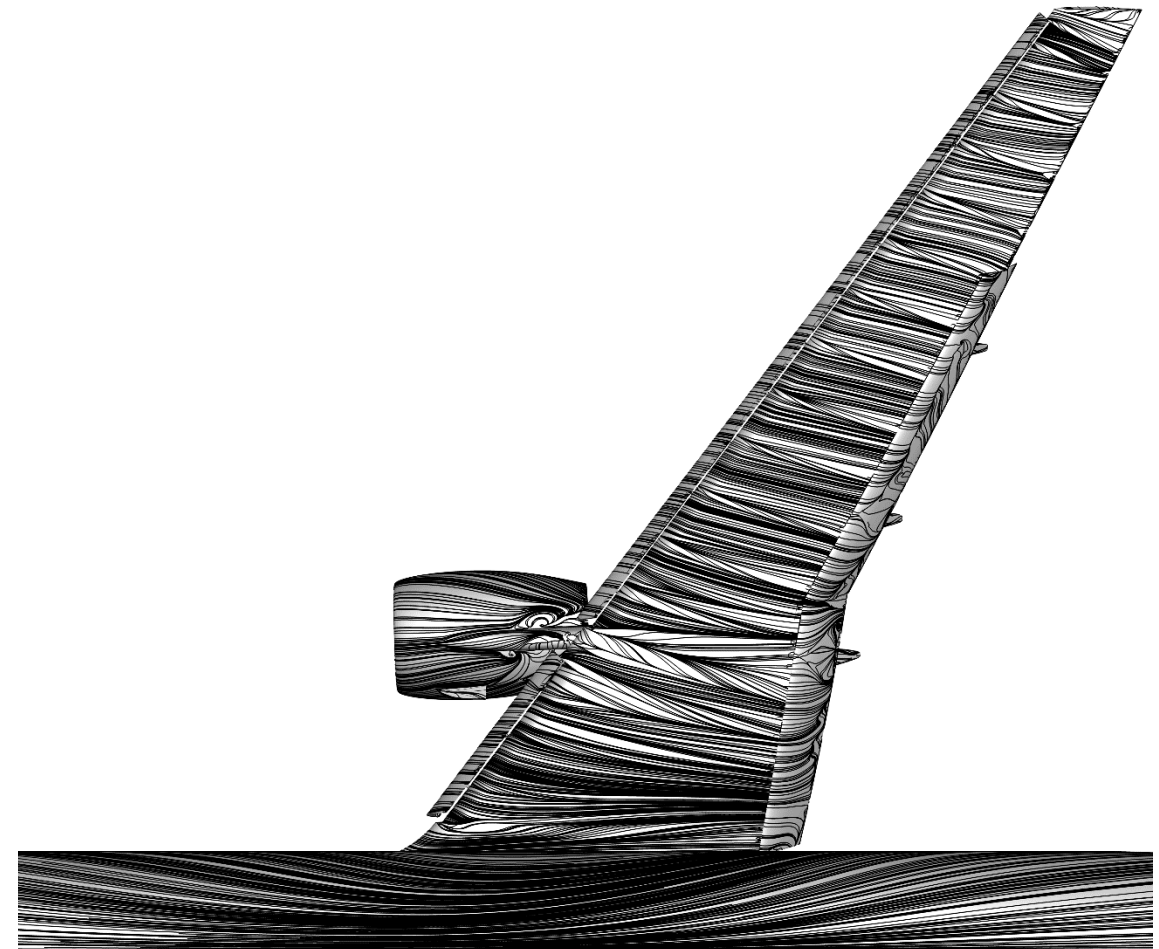
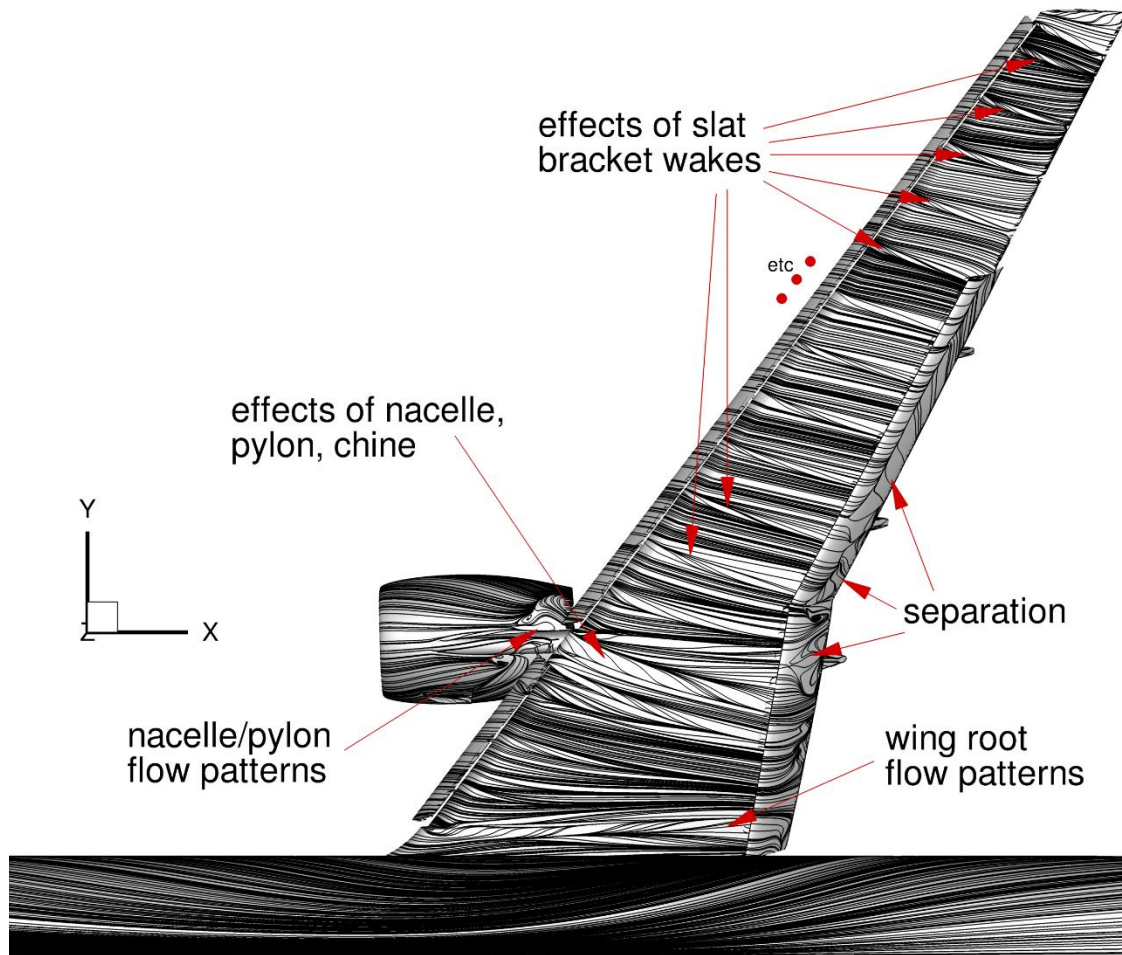
Level C:



# $\alpha = 7.05^\circ$ : линии тока

Пример с сайта воркшопа:

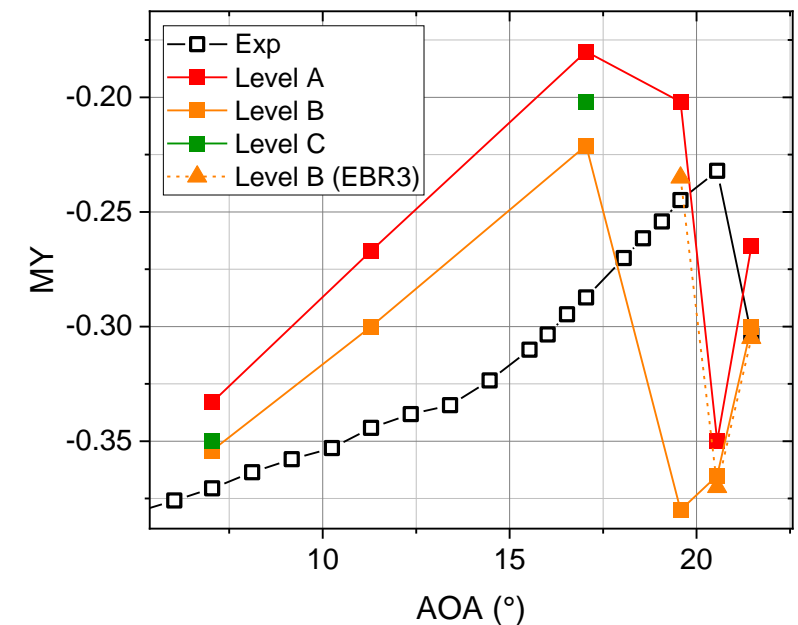
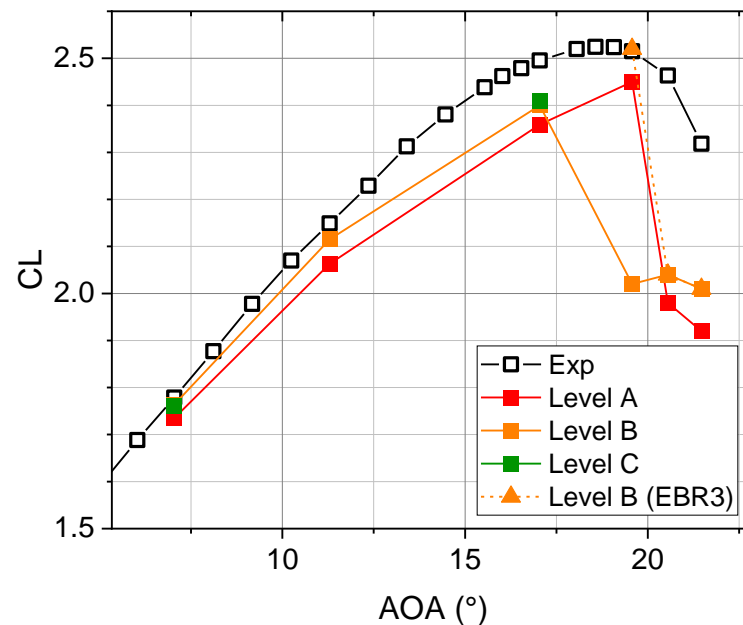
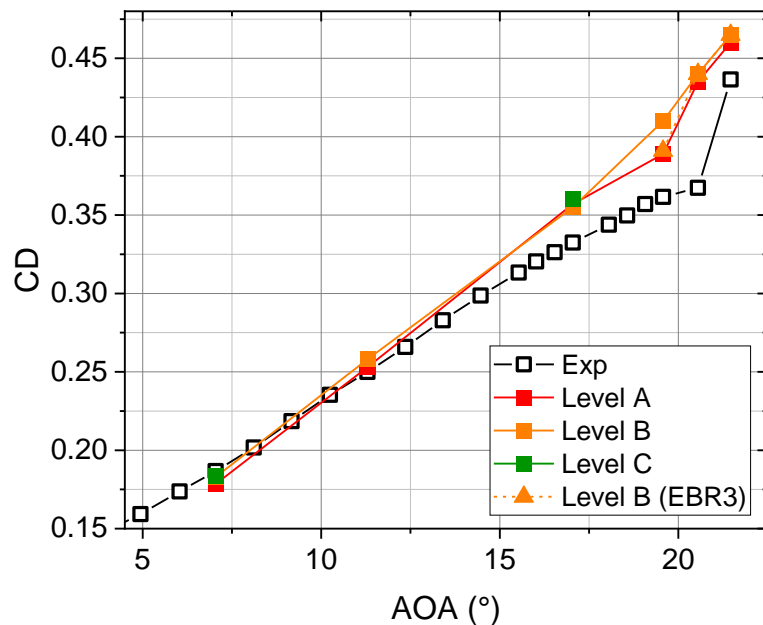
NOISEtte, Level C:



# Интегральные характеристики для всех углов атаки (CL, CD, MY)

При увеличении угла атаки точность моделирования постепенно снижается.

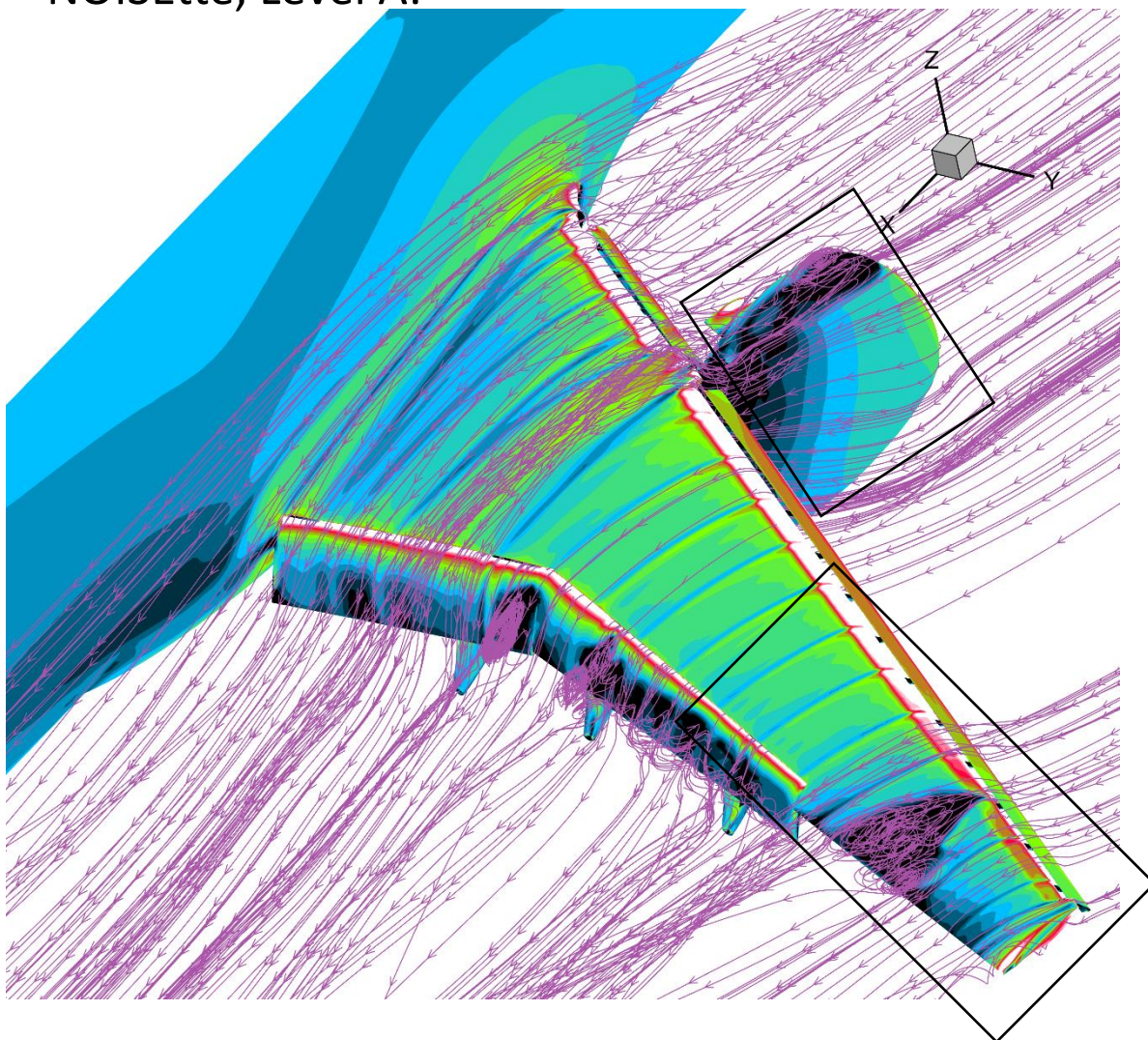
После достижения критического угла атаки несоответствие эксперимента и результатов моделирования резко возрастает, что связано с образованием ложного отрыва на крыле вблизи фюзеляжа.



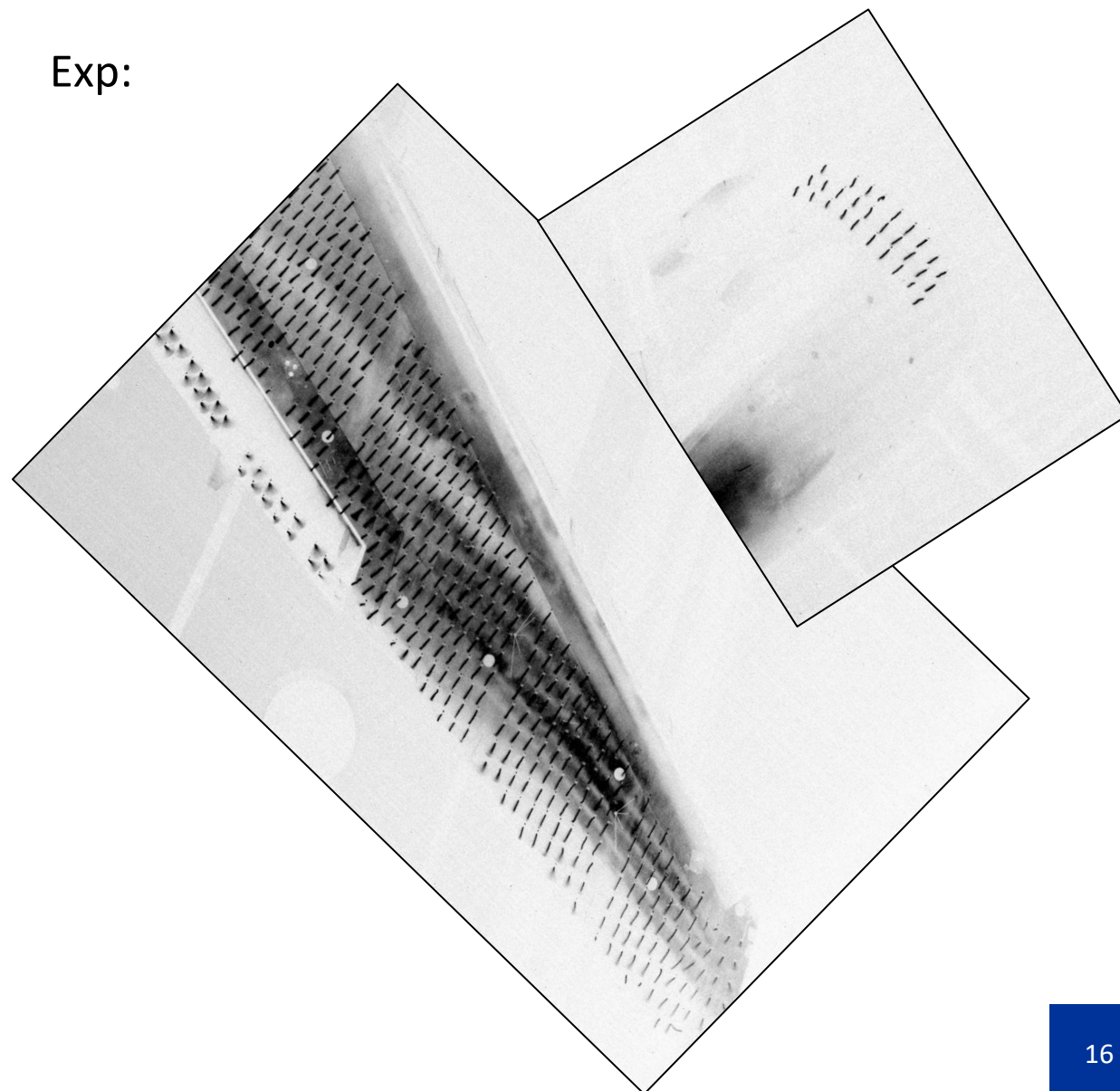


# $\alpha = 11.29^\circ$ : общий вид течения

NOISEtte, Level A:



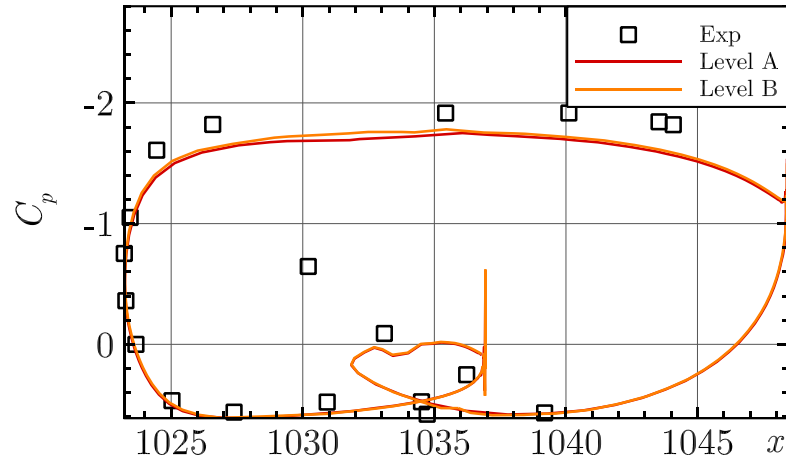
Exp:



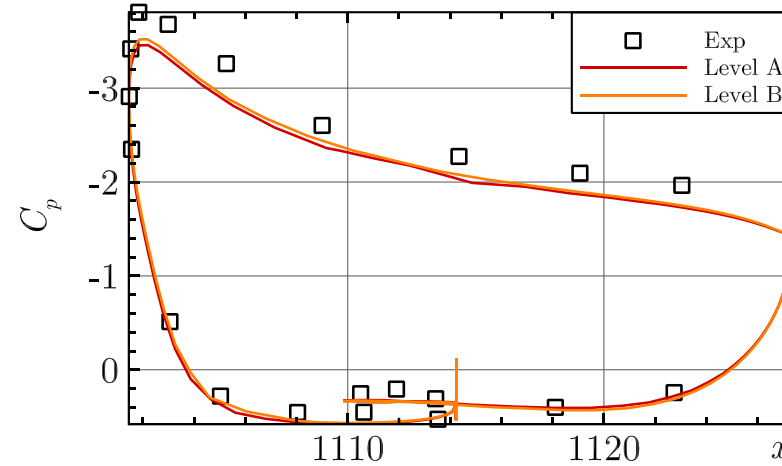


# $\alpha = 11.29^\circ$ : коэффициент давления на предкрылках

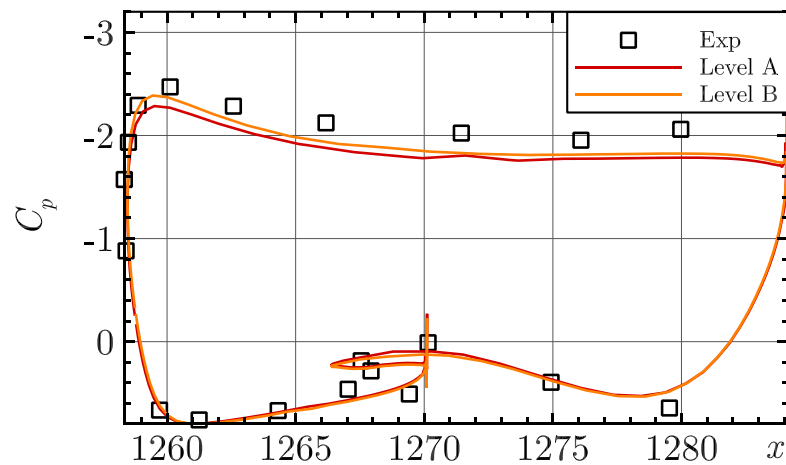
Сечение А



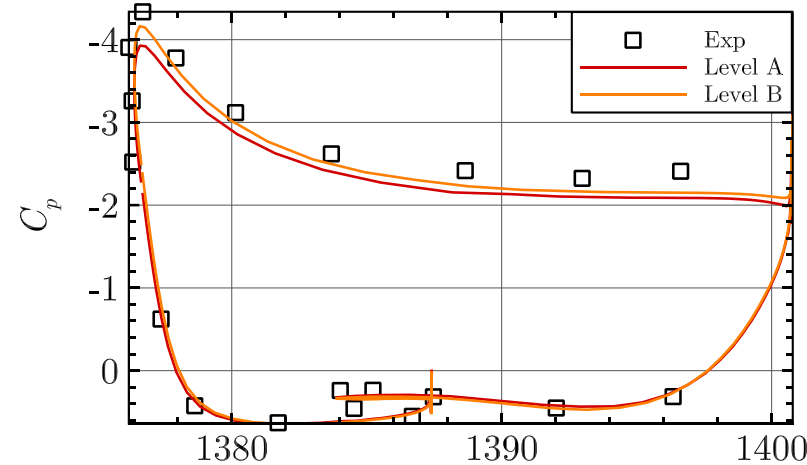
Сечение В



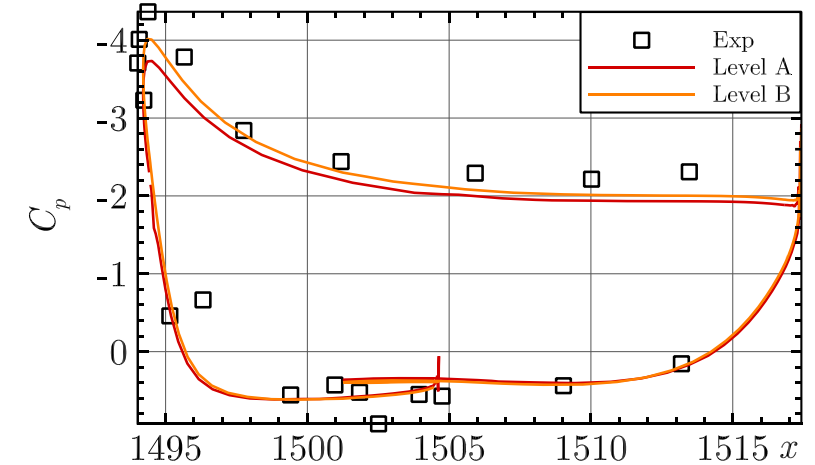
Сечение D



Сечение E

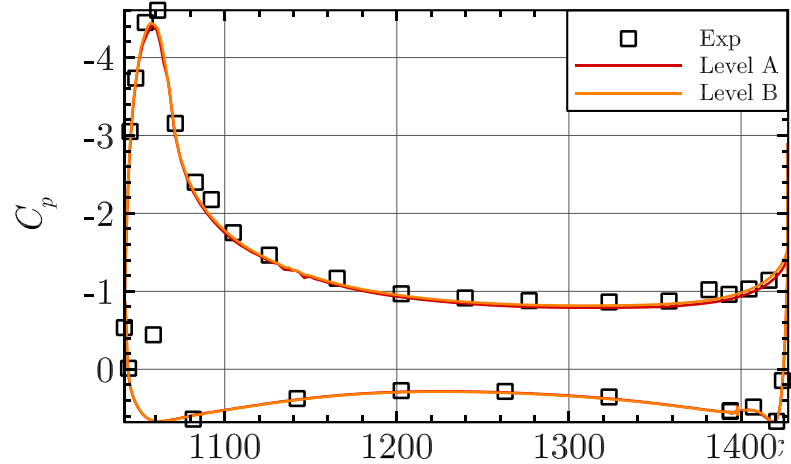


Сечение F

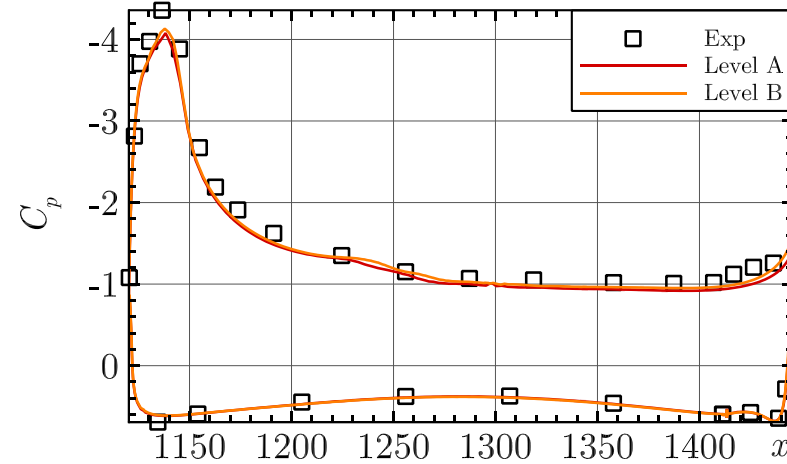


$\alpha = 11.29^\circ$ : коэффициент давления на крыле

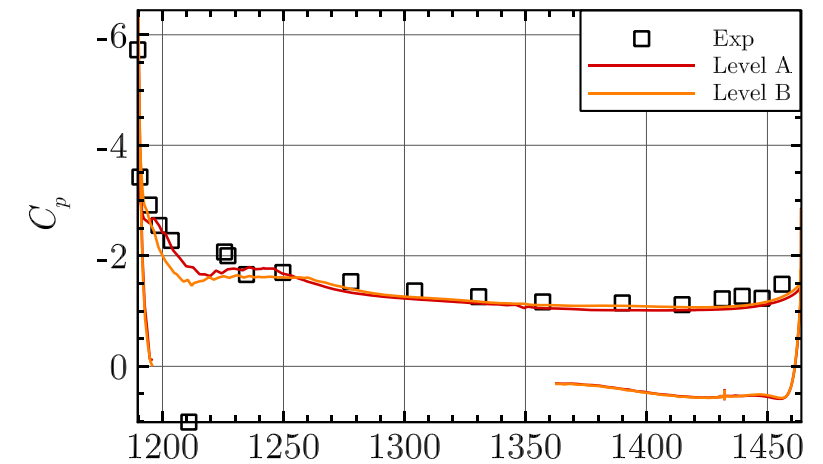
Сечение А



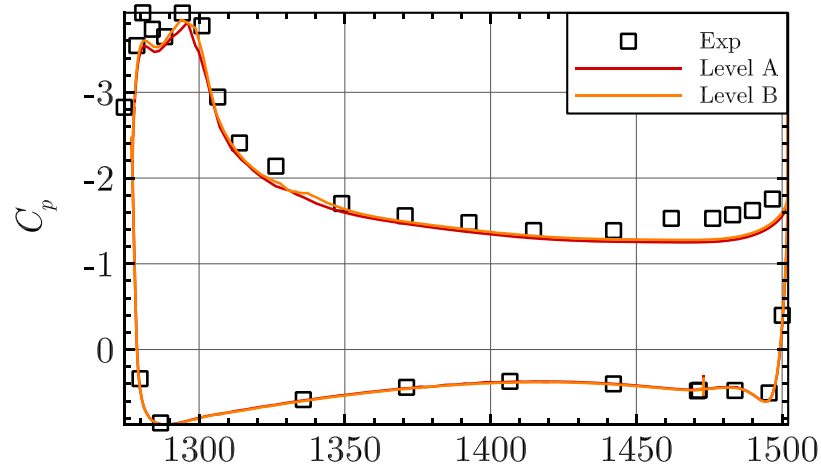
Сечение В



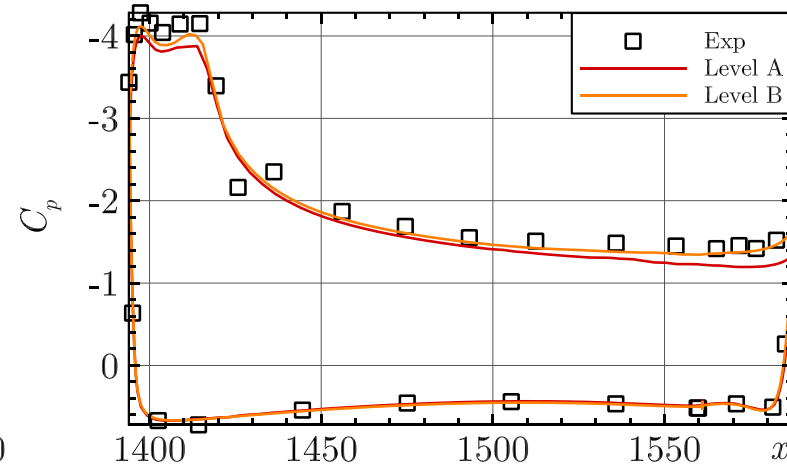
Сечение С



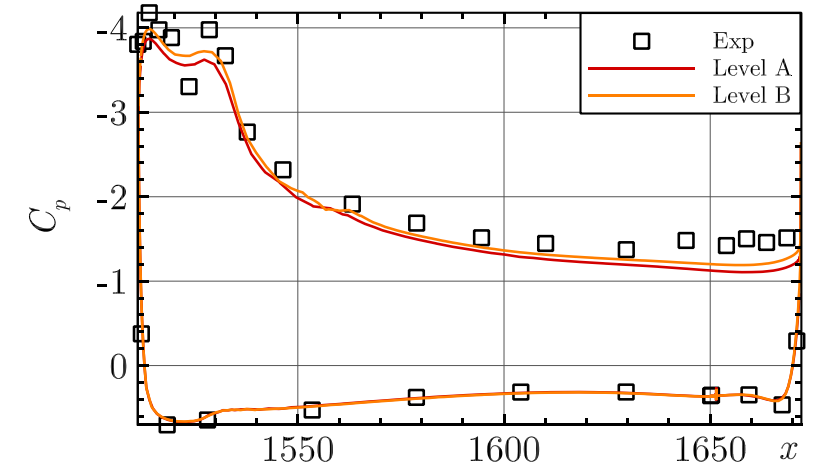
Сечение D



Сечение E



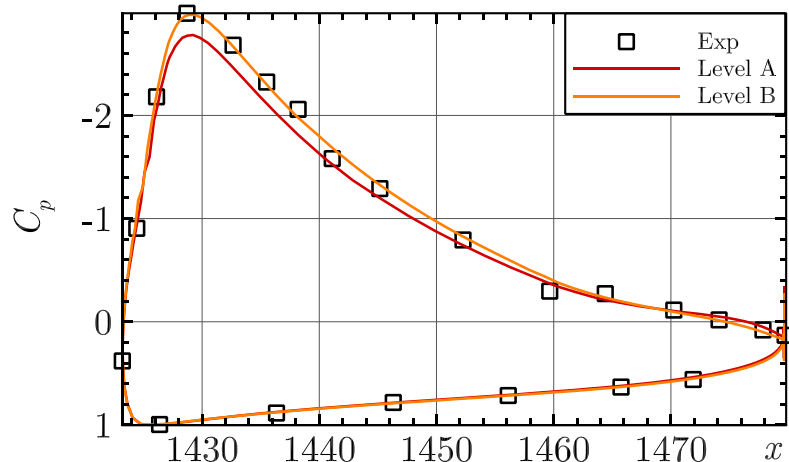
Сечение F



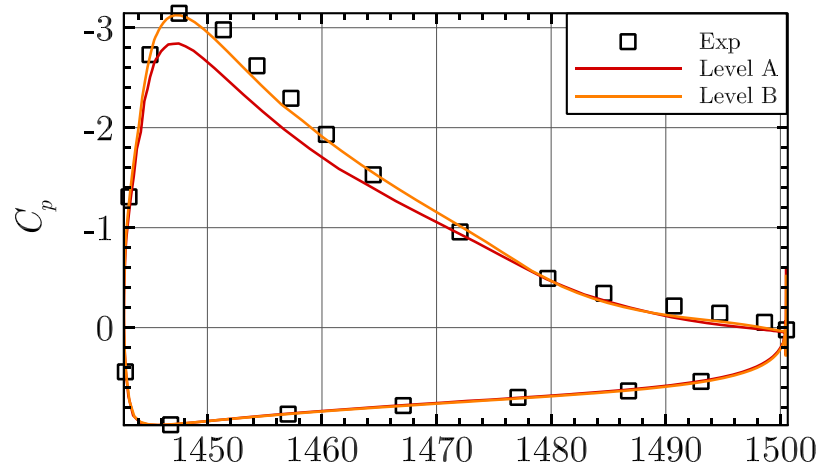


# $\alpha = 11.29^\circ$ : коэффициент давления на закрылках

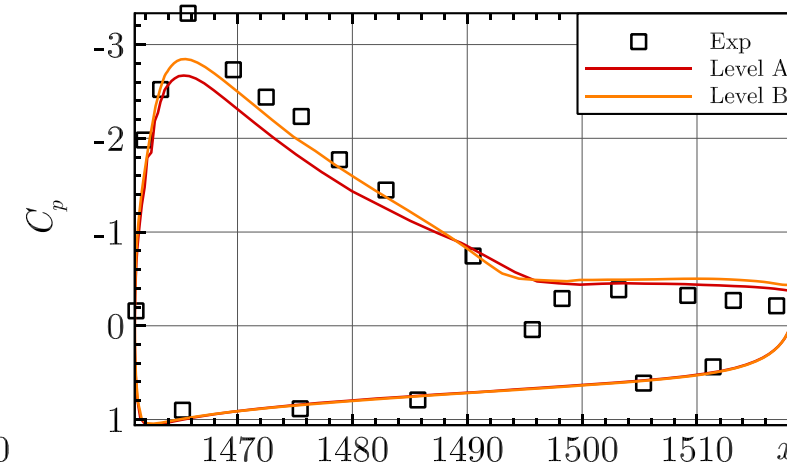
Сечение А



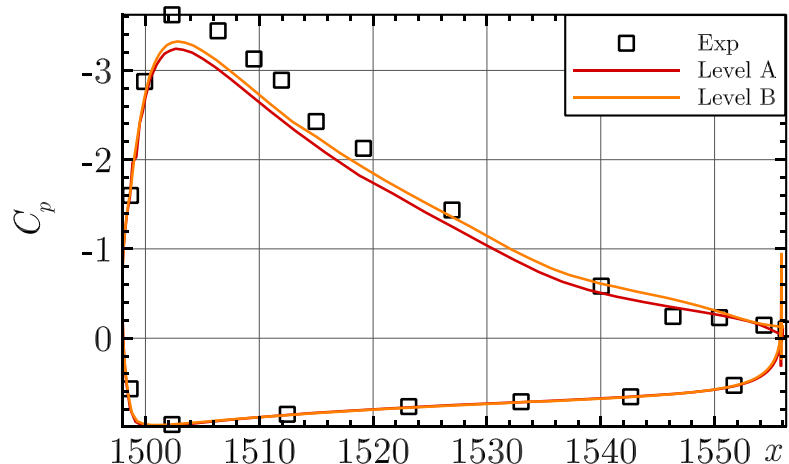
Сечение В



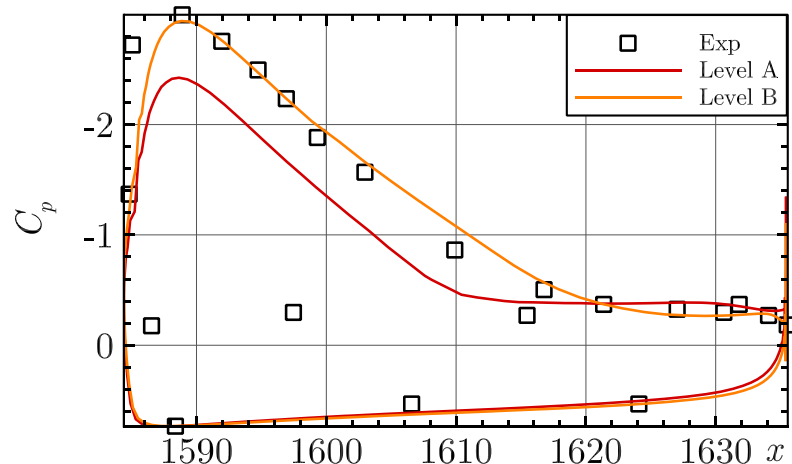
Сечение С



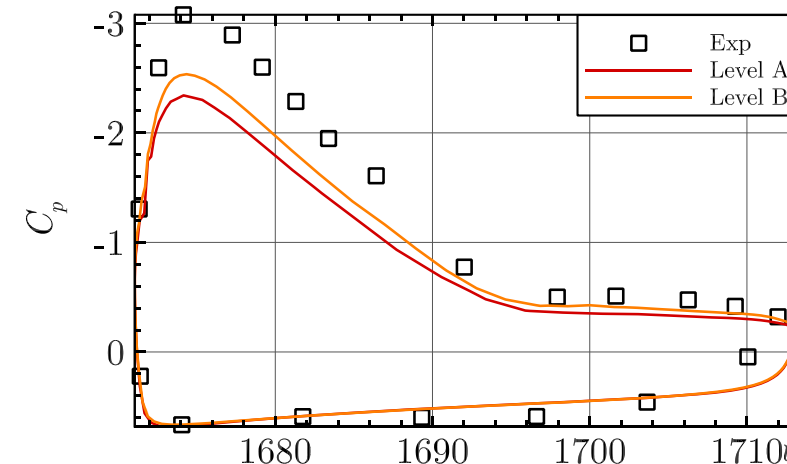
Сечение D



Сечение E

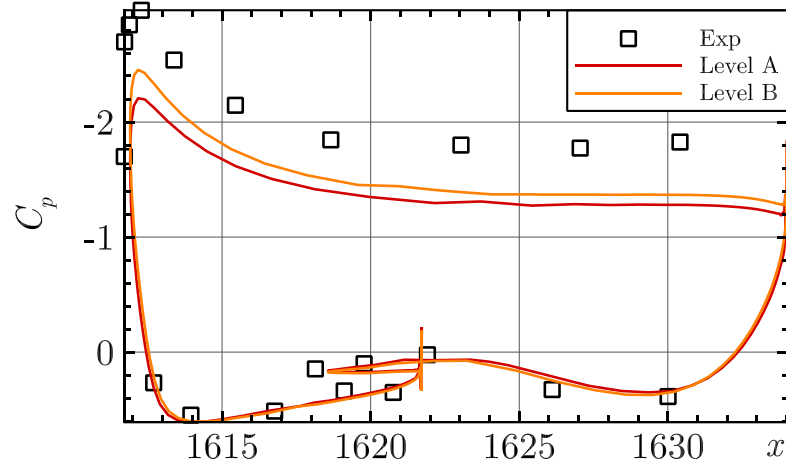


Сечение F

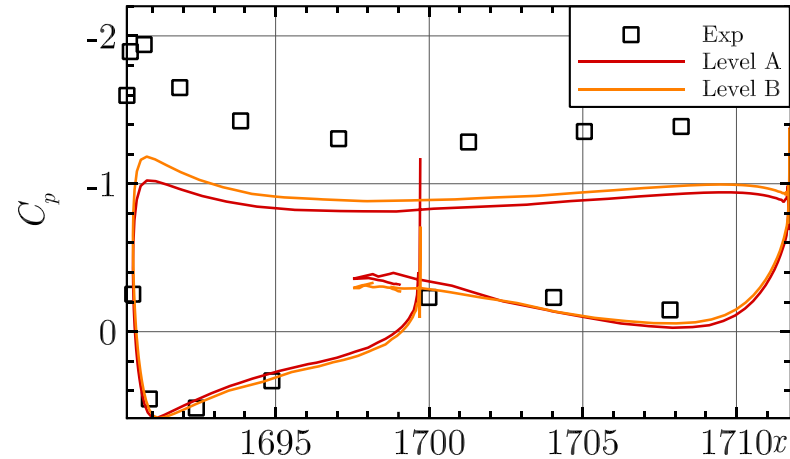


# $\alpha = 11.29^\circ$ : коэффициент давления наблизи законцовки крыла

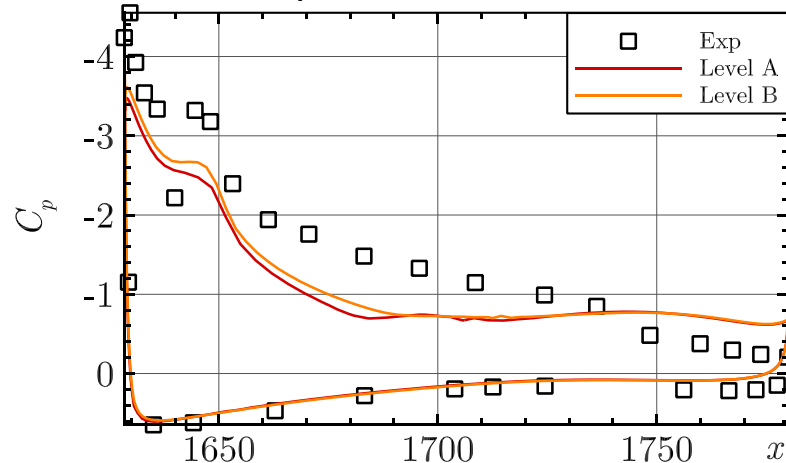
Предкрылок: Сечение G



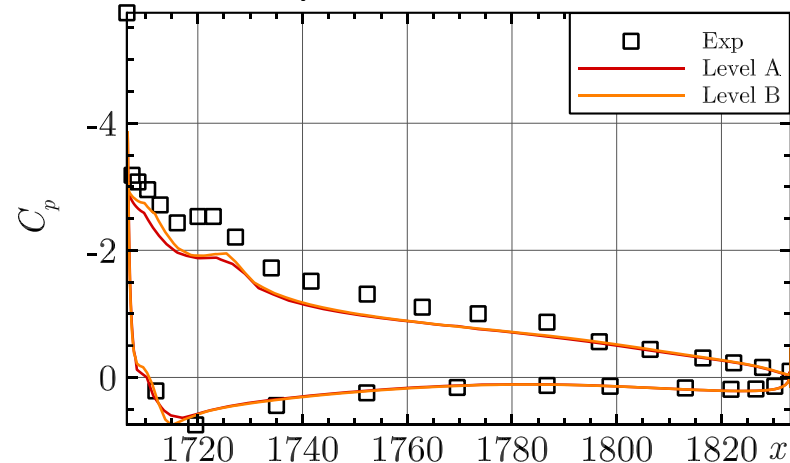
Предкрылок: Сечение H



Крыло: Сечение G



Крыло: Сечение H

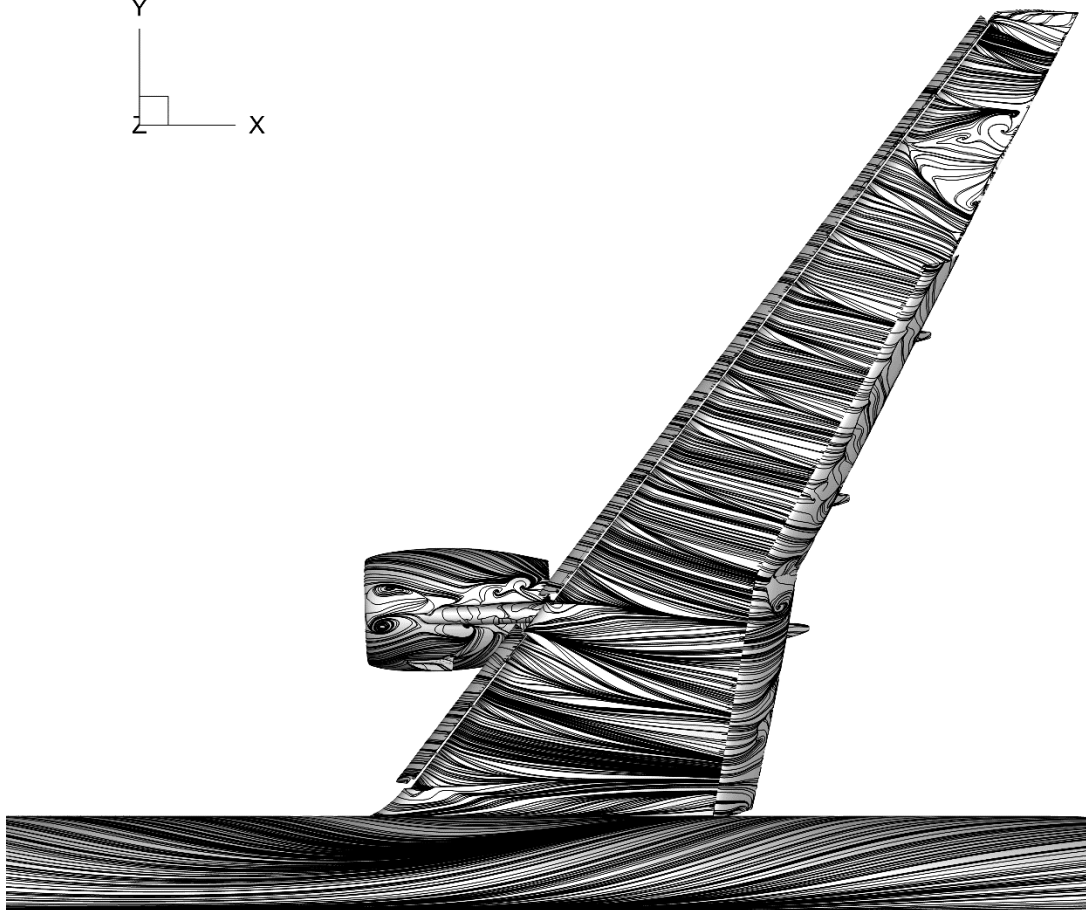
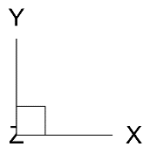


Ложный отрыв вблизи законцовки крыла оказывает существенное влияние на распределение давления

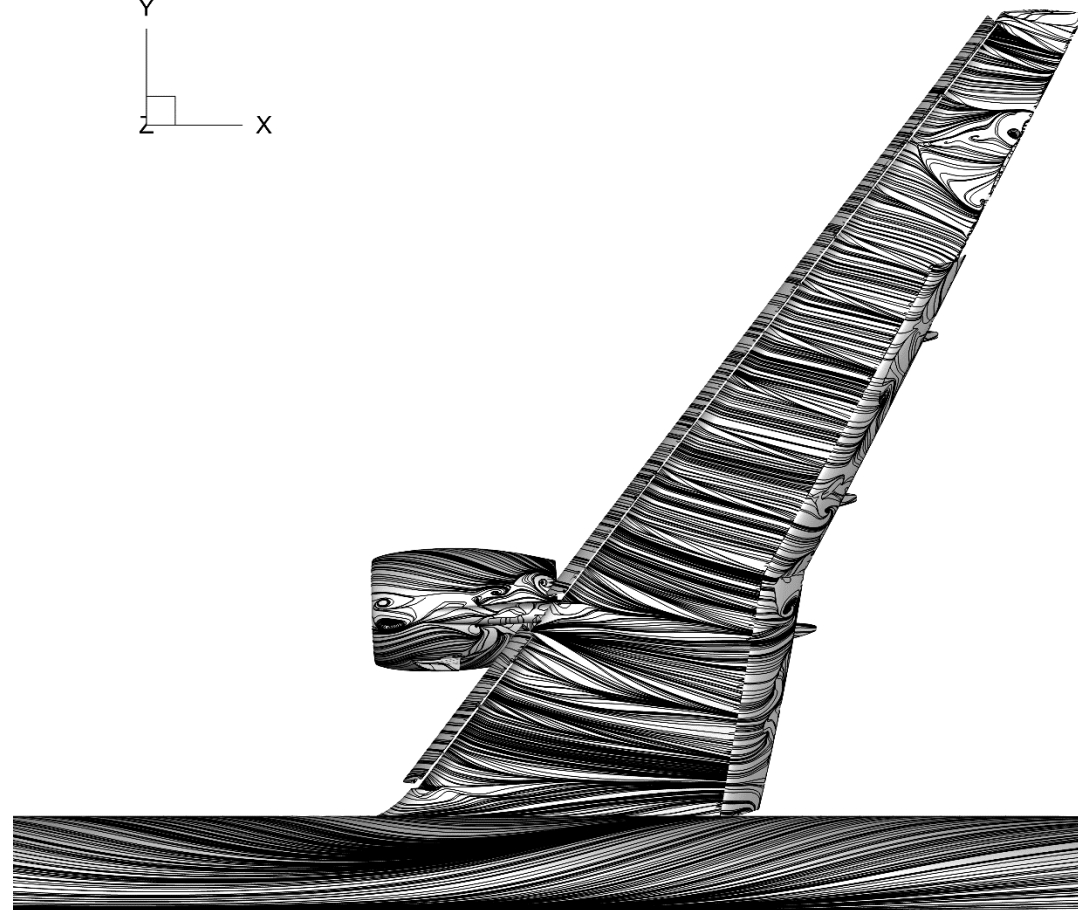
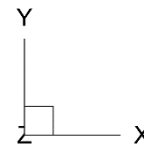


# $\alpha = 11.29^\circ$ : линии тока

Level A:



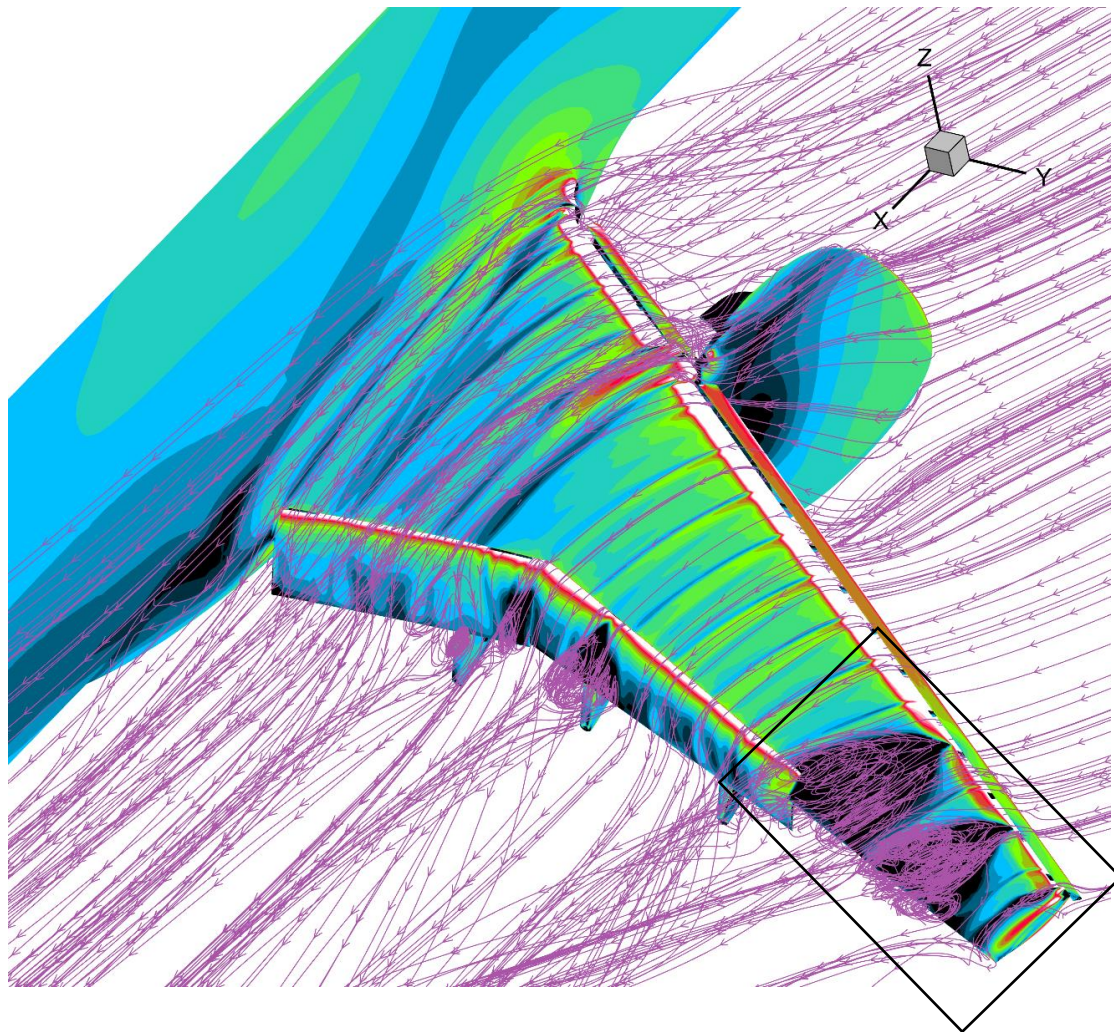
Level B:



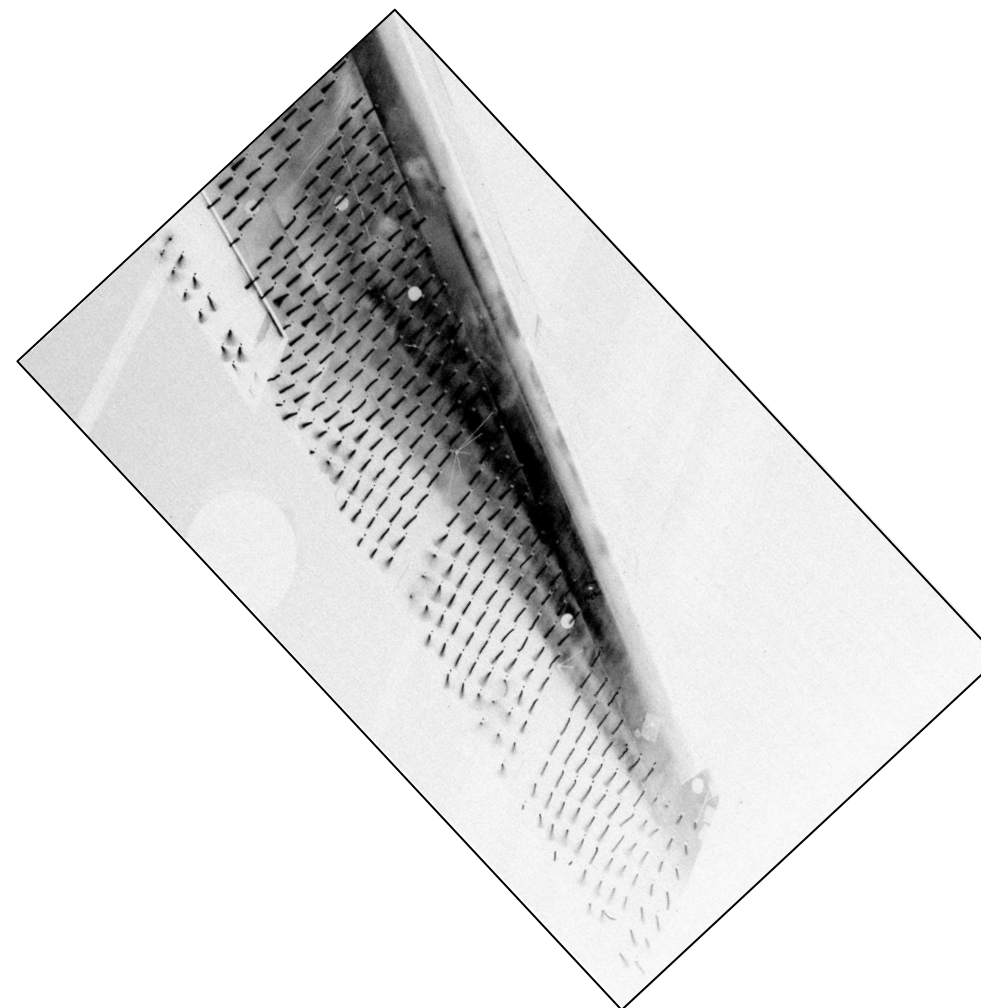


$\alpha = 17.05^\circ$ : общий вид течения

NOISEtte, Level A:



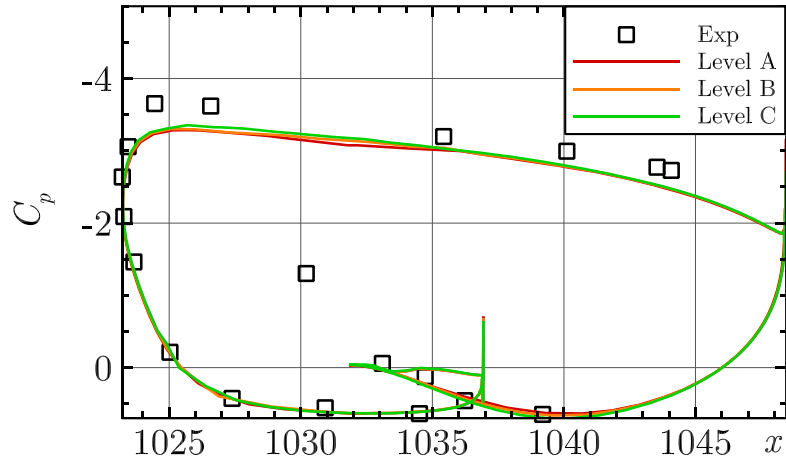
Exp:



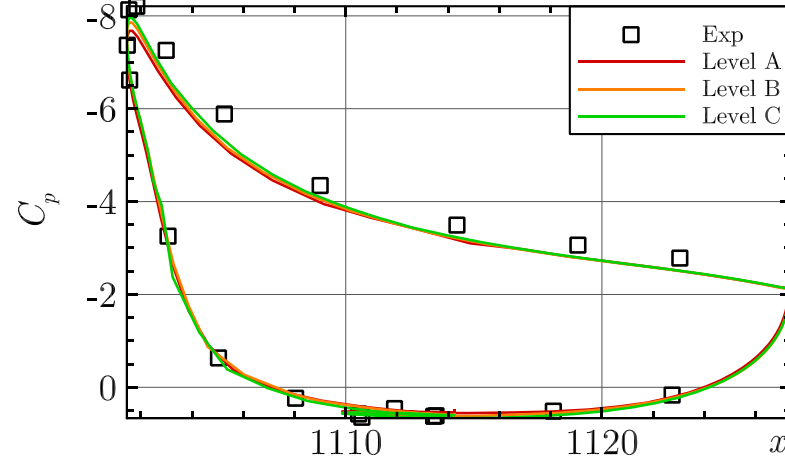


# $\alpha = 17.05^\circ$ : коэффициент давления на предкрылках

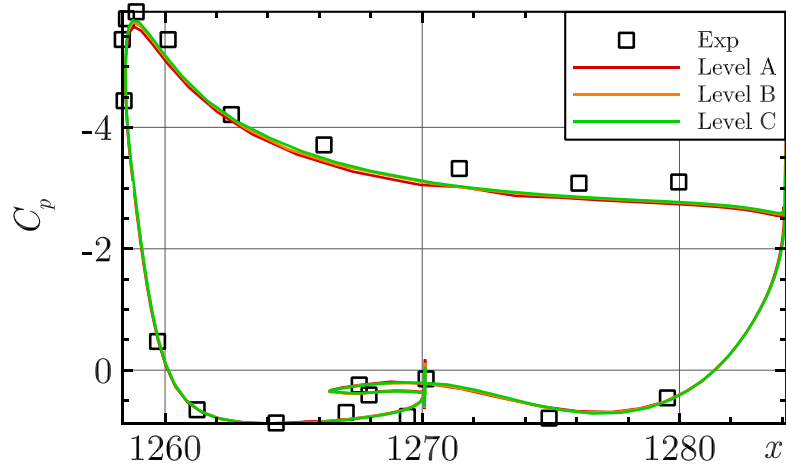
Сечение А



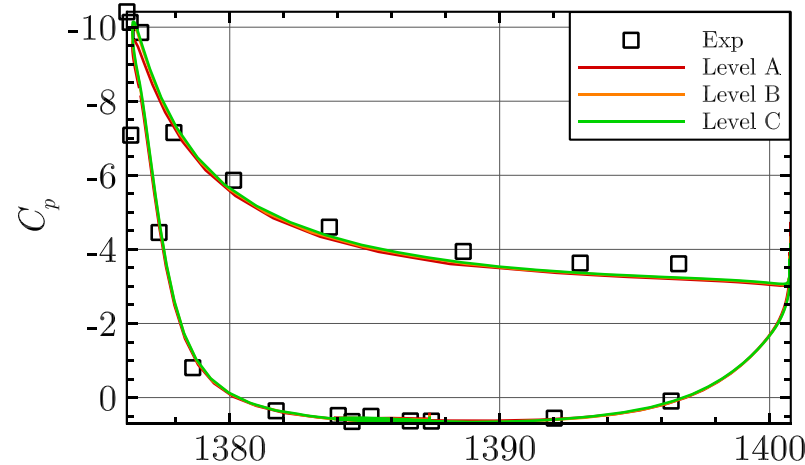
Сечение В



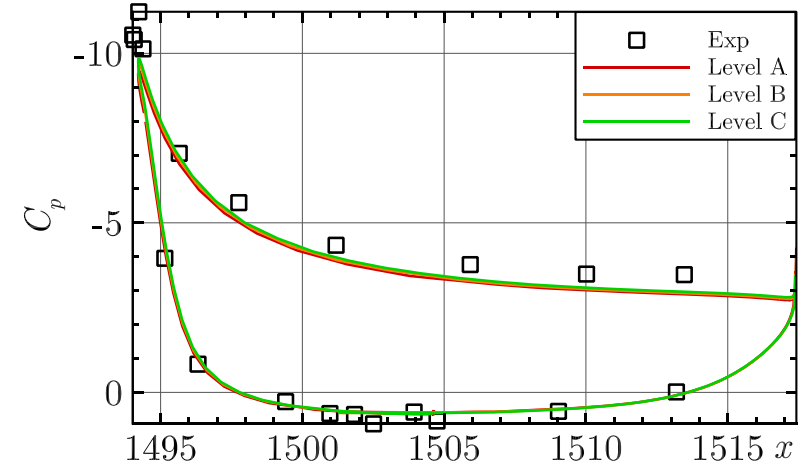
Сечение D



Сечение Е



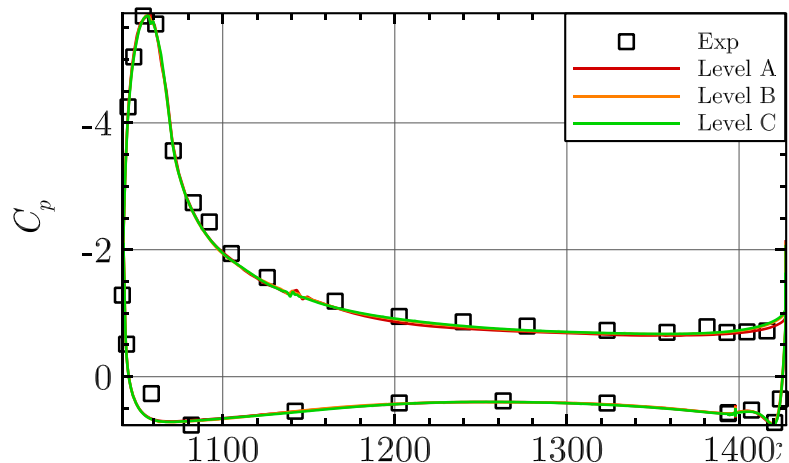
Сечение F



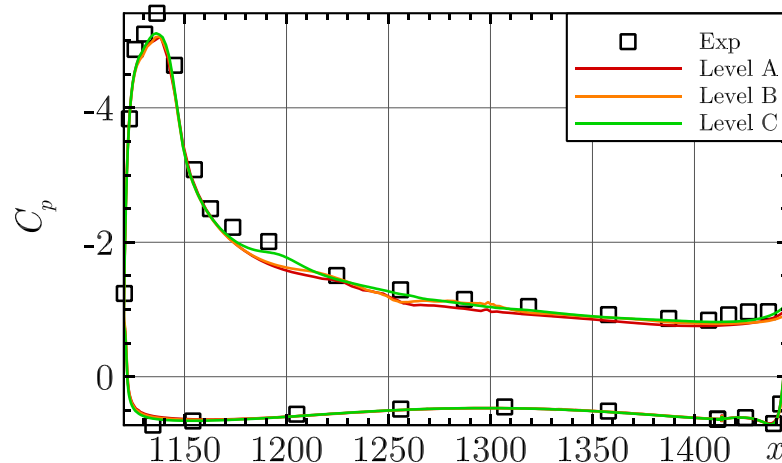


# $\alpha = 17.05^\circ$ : коэффициент давления на крыле

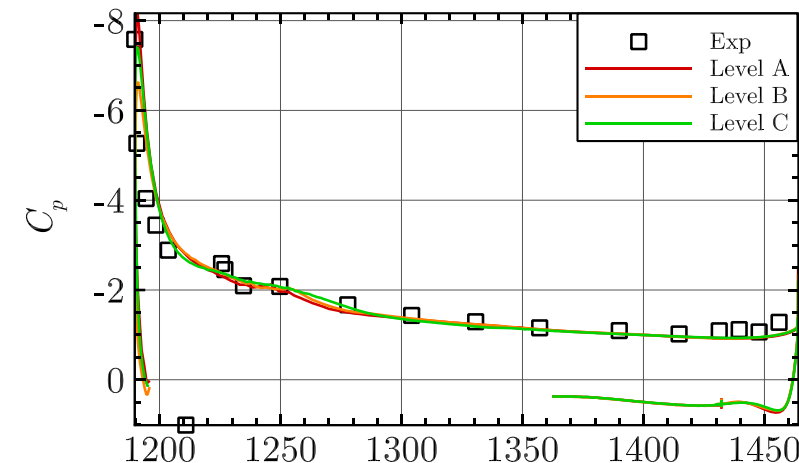
Сечение А



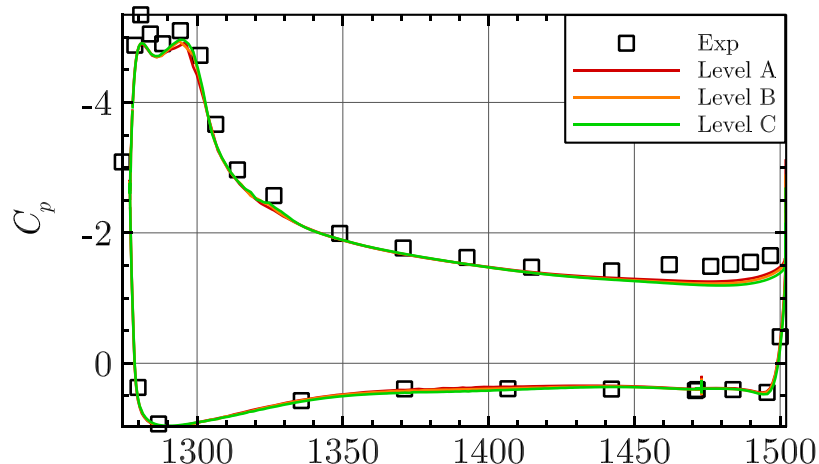
Сечение В



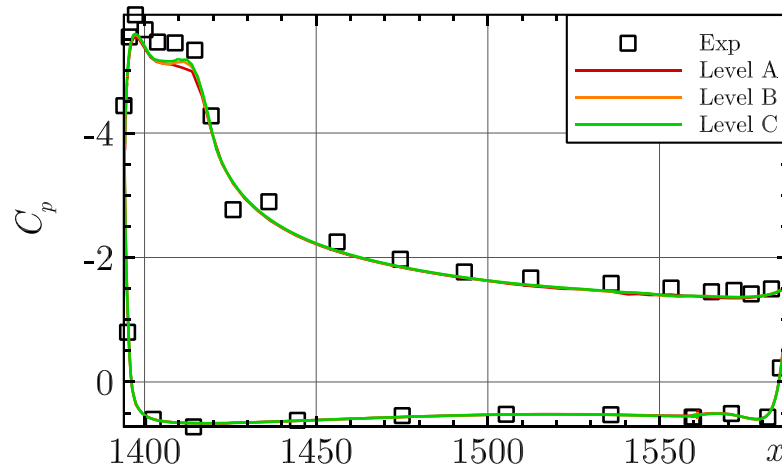
Сечение С



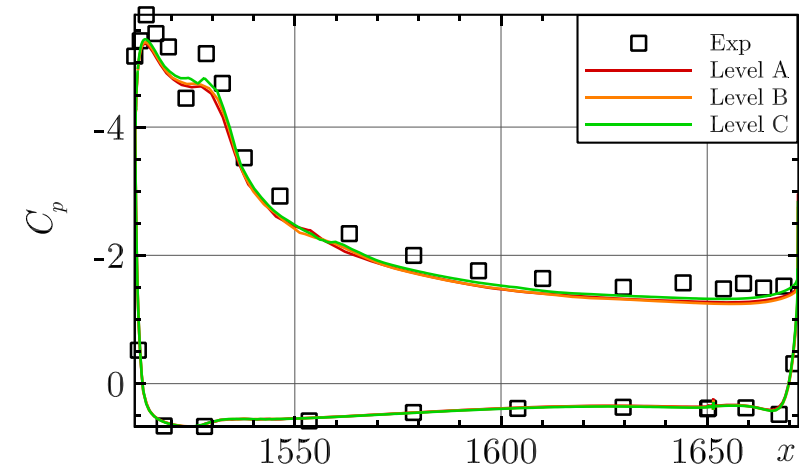
Сечение D



Сечение E



Сечение F

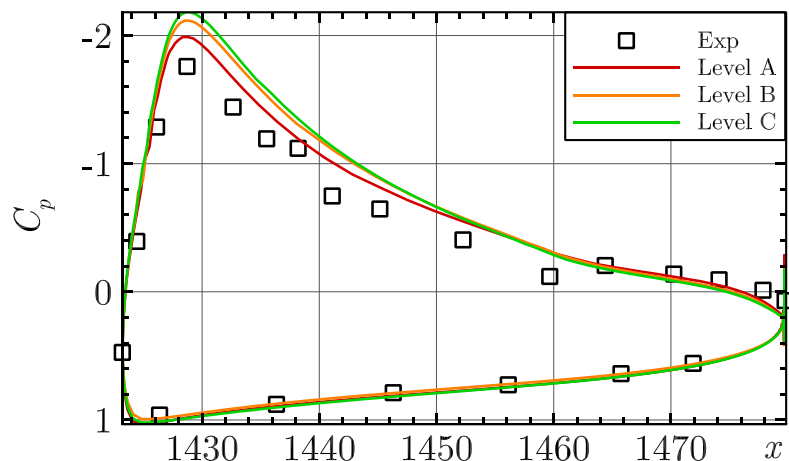




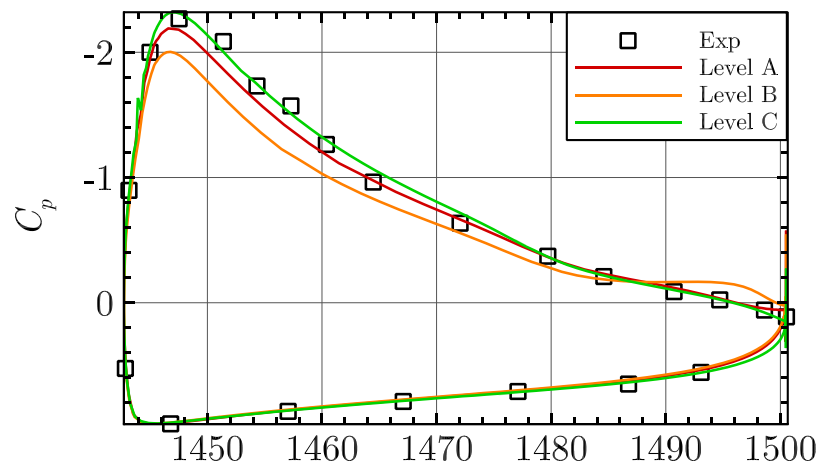


# $\alpha = 17.05^\circ$ : коэффициент давления на закрылках

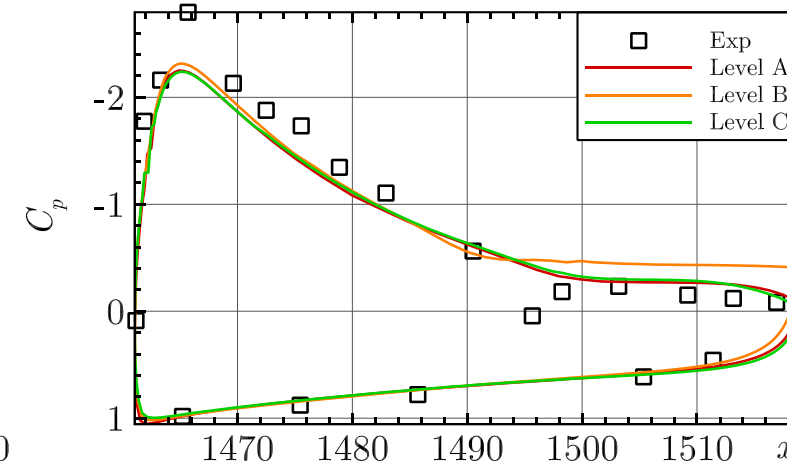
Сечение А



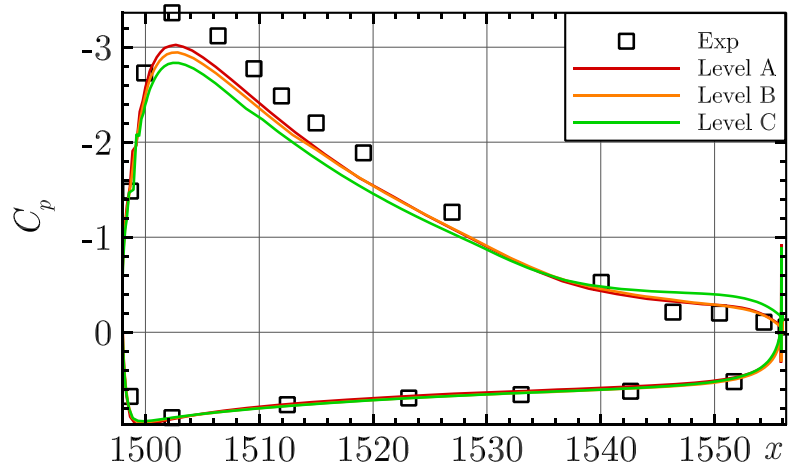
Сечение В



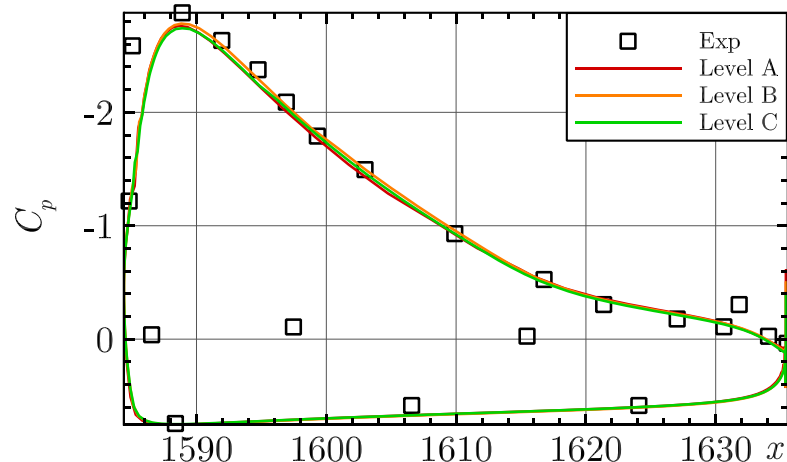
Сечение С



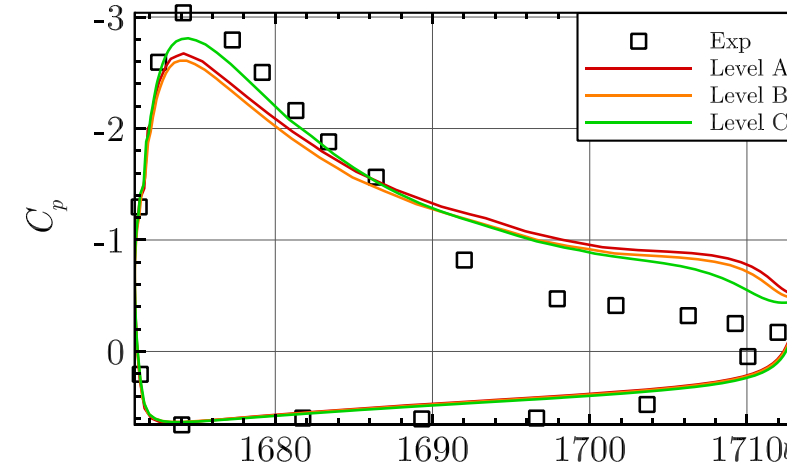
Сечение D



Сечение Е

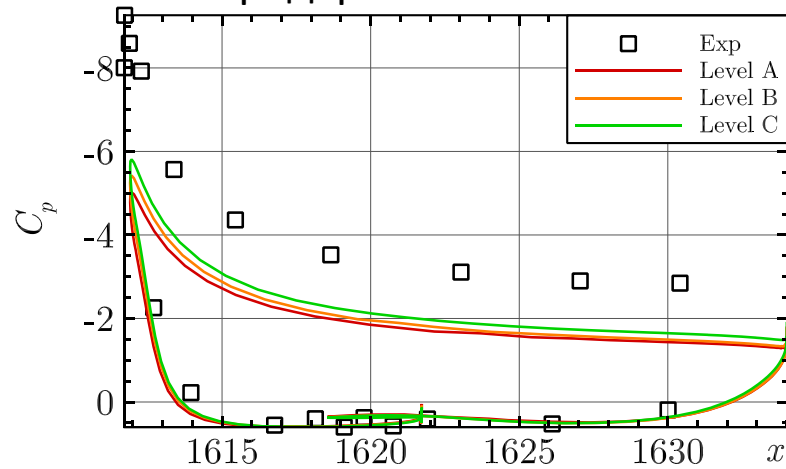


Сечение F

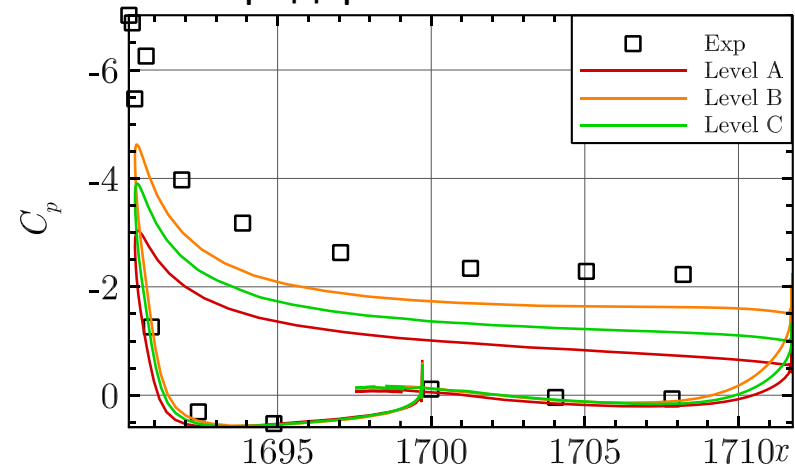


# $\alpha = 17.05^\circ$ : коэффициент давления наблизи законцовки крыла

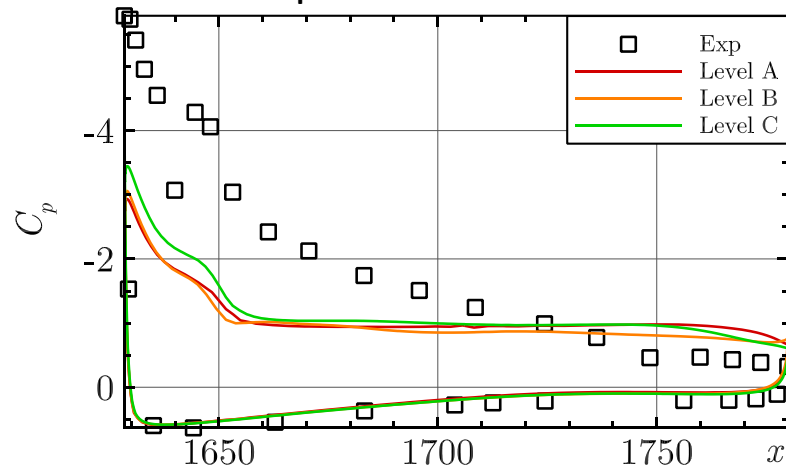
Предкрылок: Сечение G



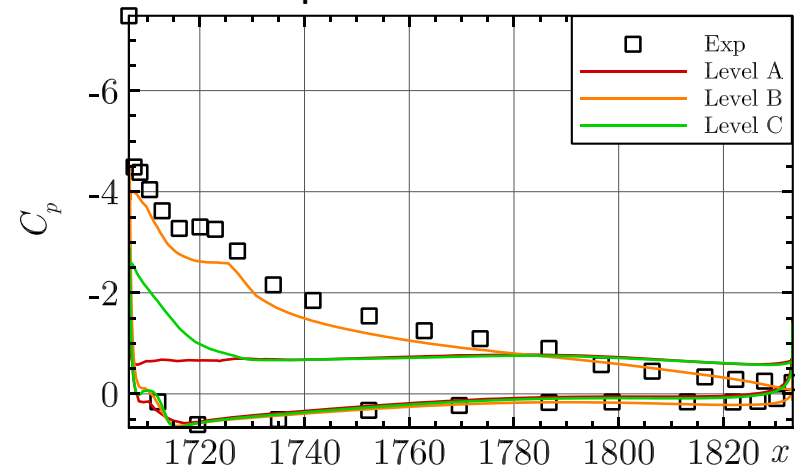
Предкрылок: Сечение H



Крыло: Сечение G



Крыло: Сечение H





# $\alpha = 17.05^\circ$ : линии тока

Level A:



Level B:



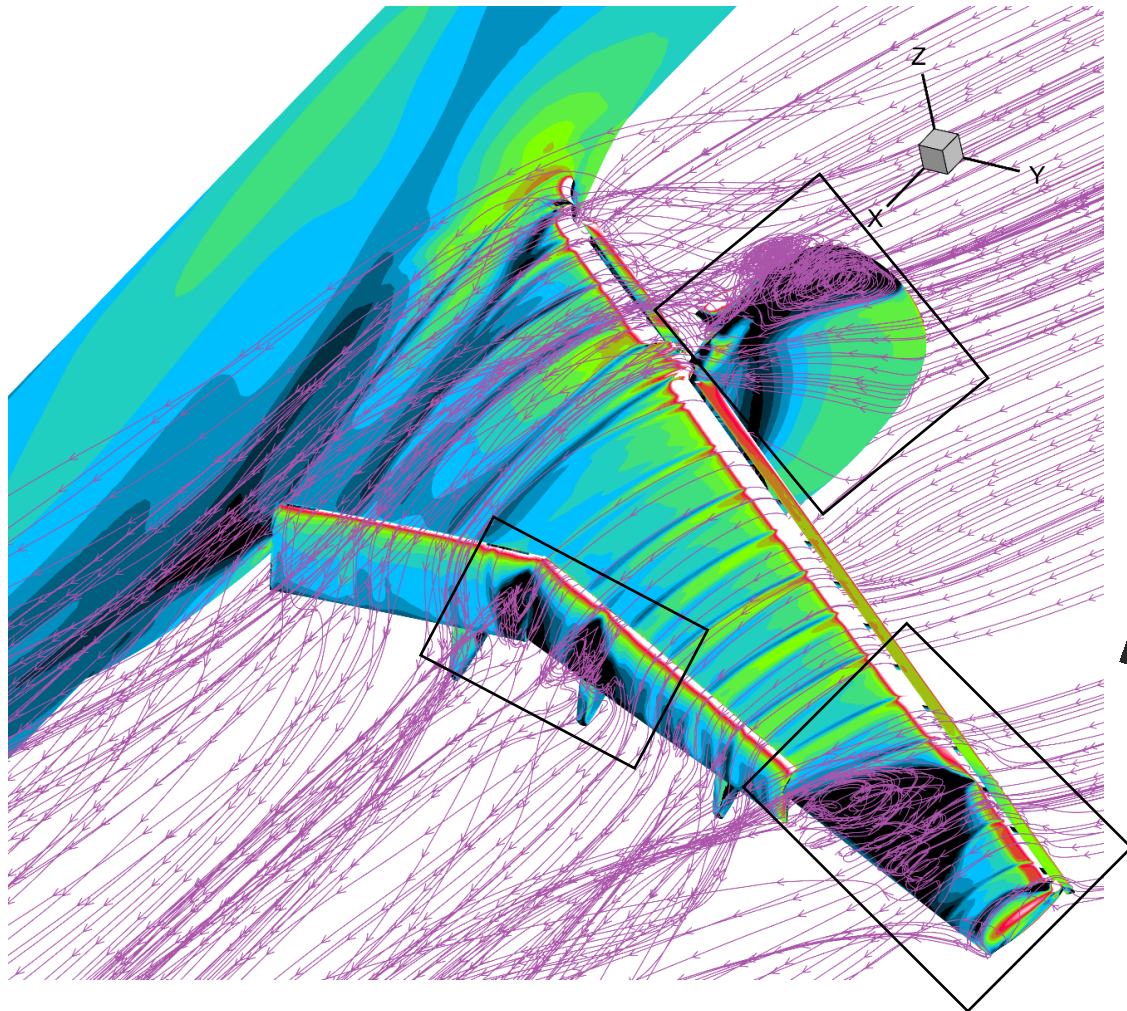
Level C:



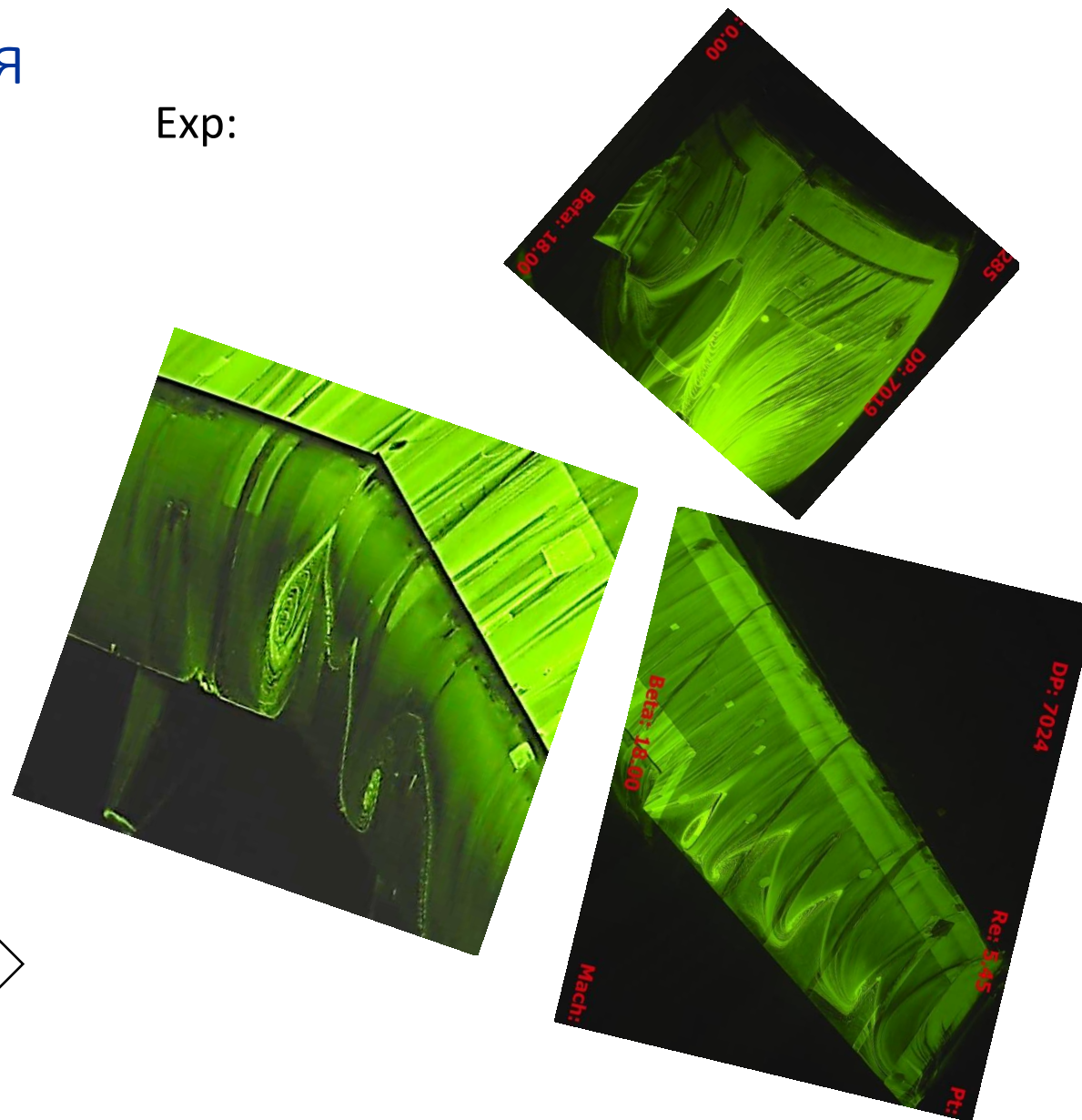


# $\alpha = 19.57^\circ$ : общий вид течения

NOISEtte, Level A:



Exp:



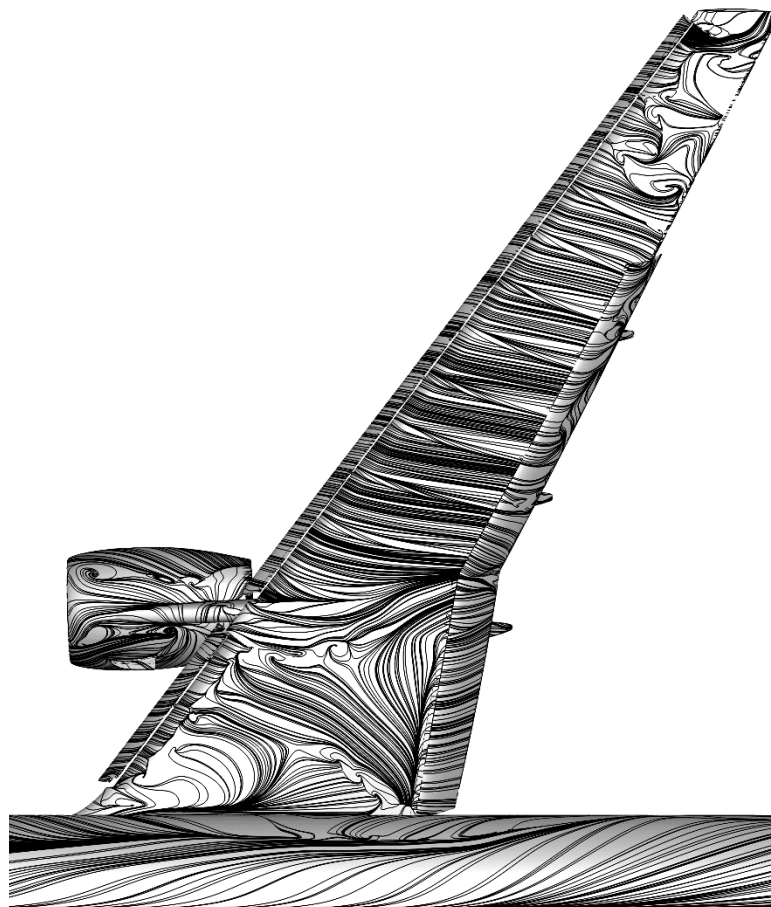


$\alpha = 19.57^\circ$ : линии тока

Level A:



Level B:

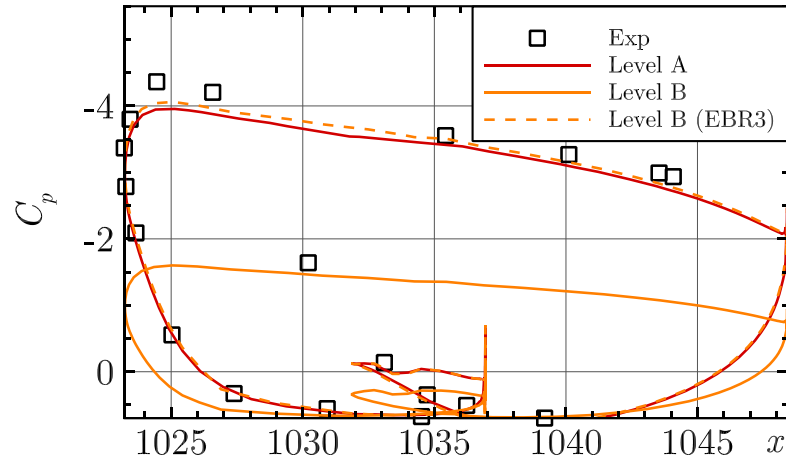


Level B (EBR3):

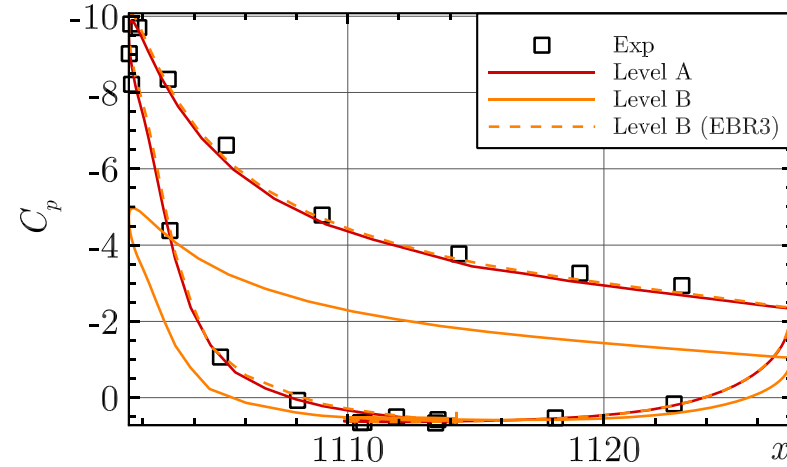


# $\alpha = 19.57^\circ$ : коэффициент давления на предкрылках

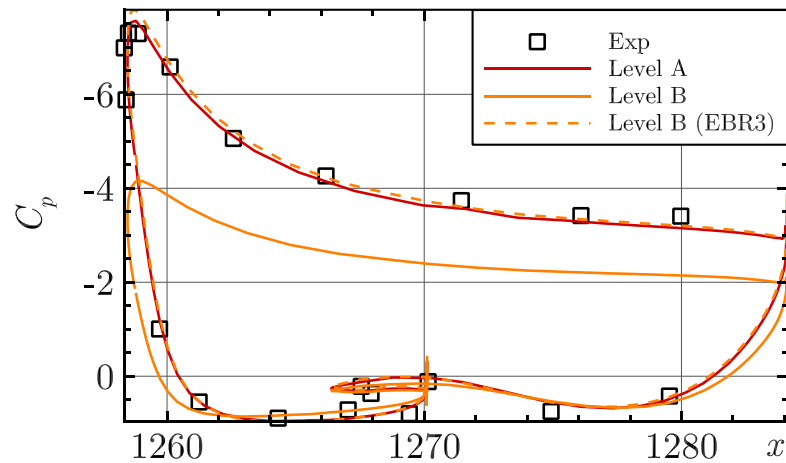
Сечение А



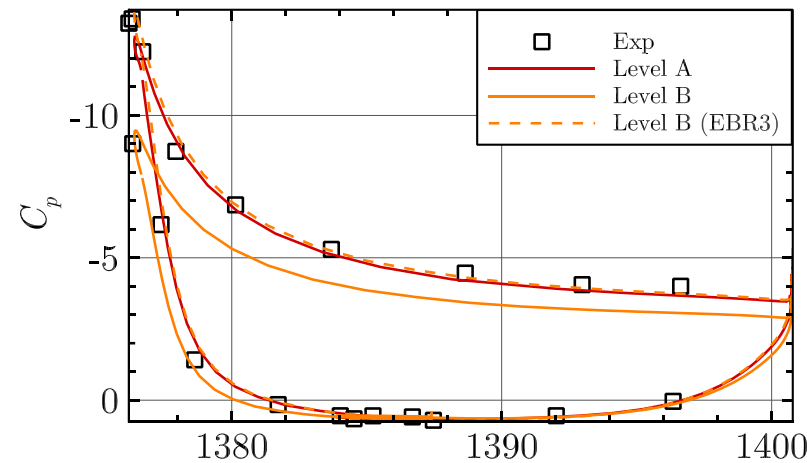
Сечение В



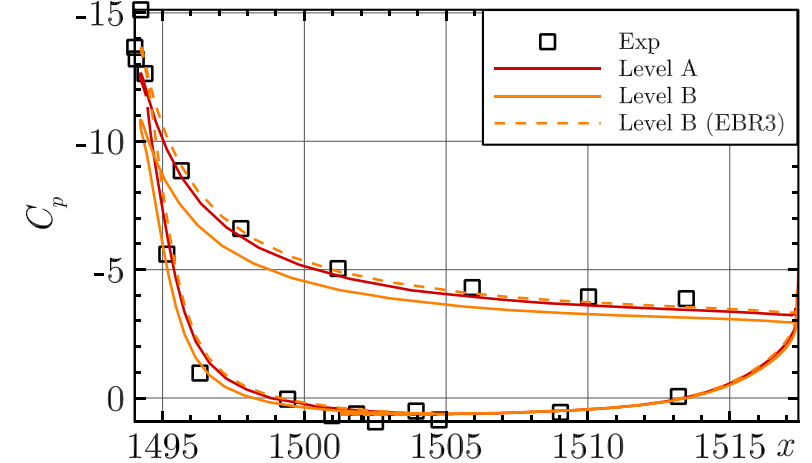
Сечение D



Сечение E



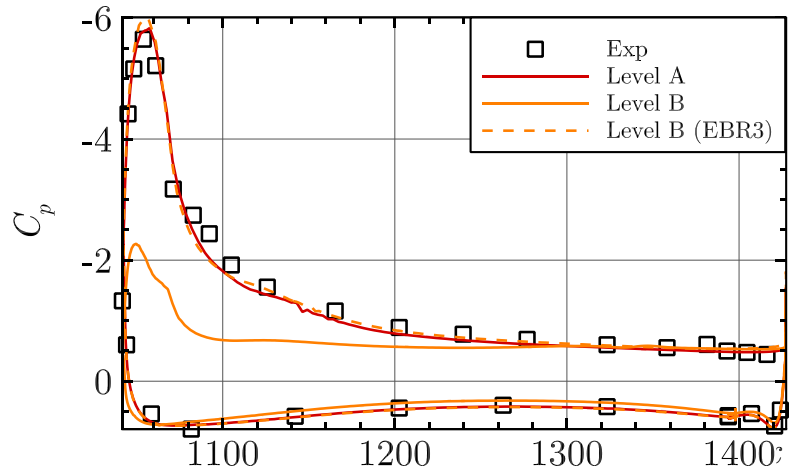
Сечение F



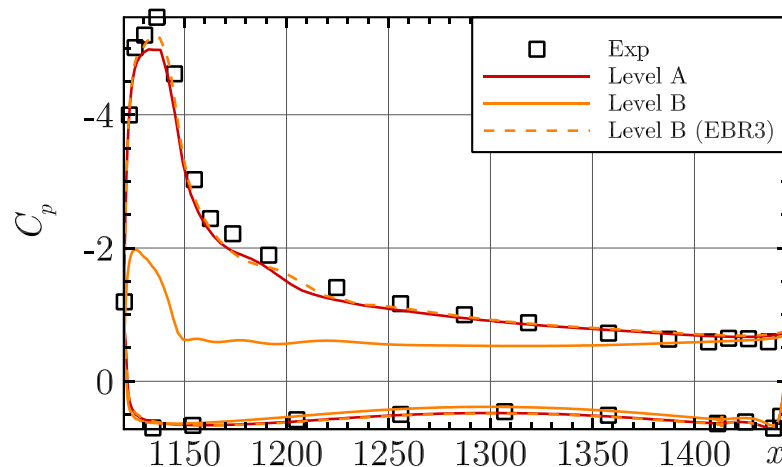


# $\alpha = 19.57^\circ$ : коэффициент давления на крыле

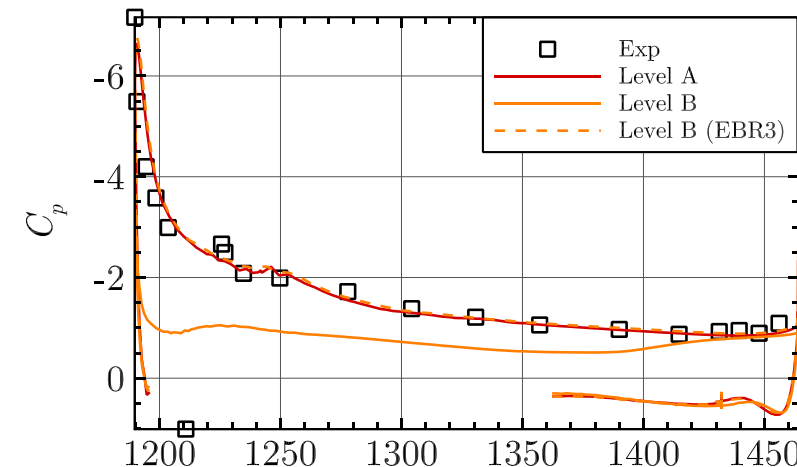
Сечение А



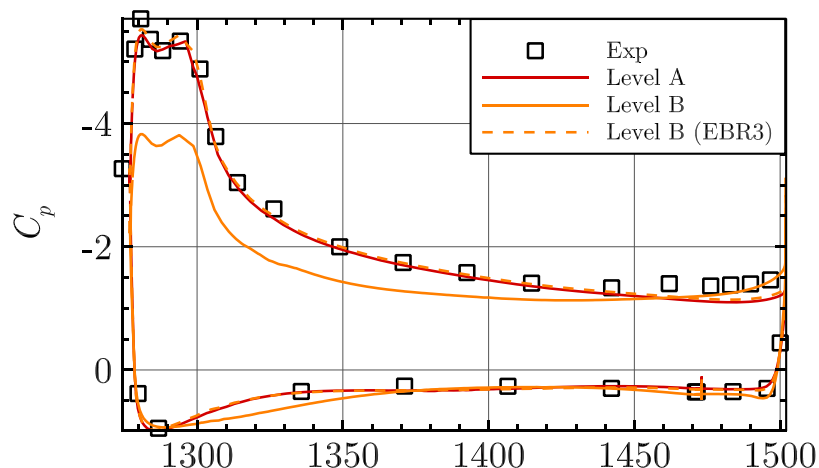
Сечение В



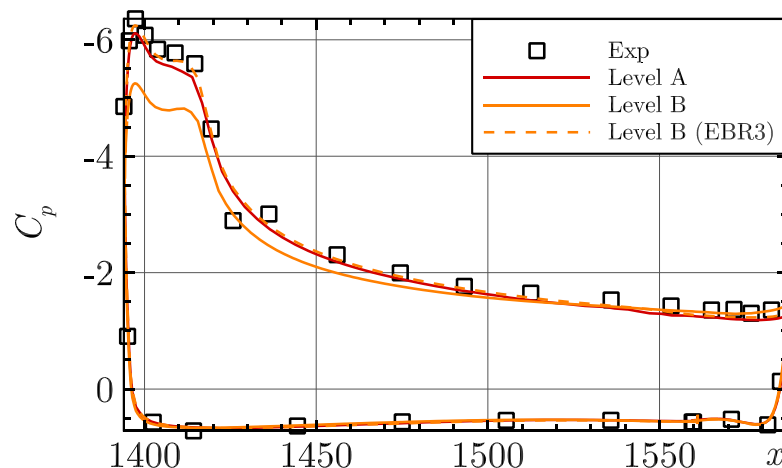
Сечение С



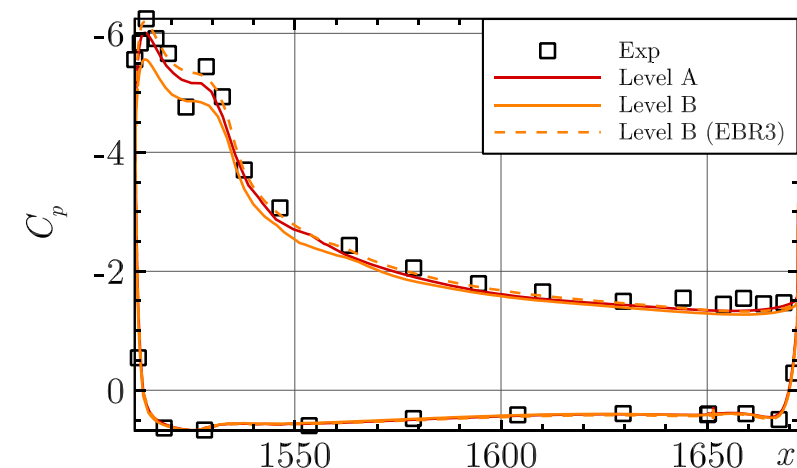
Сечение D



Сечение E

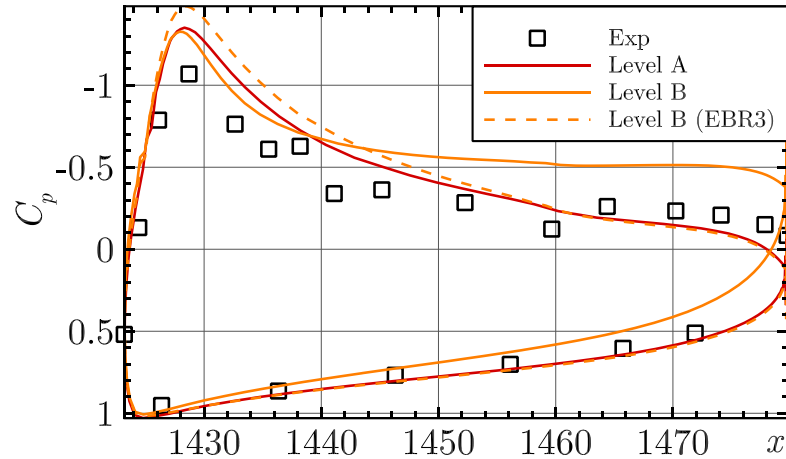


Сечение F

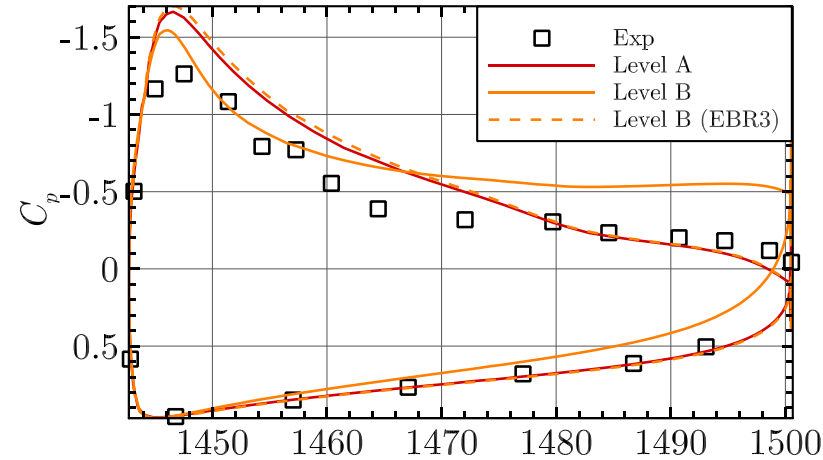


# $\alpha = 19.57^\circ$ : коэффициент давления на закрылках

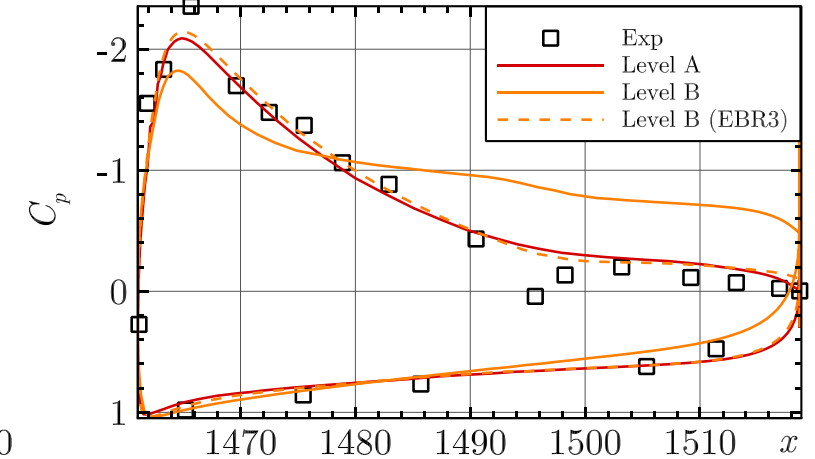
Сечение А



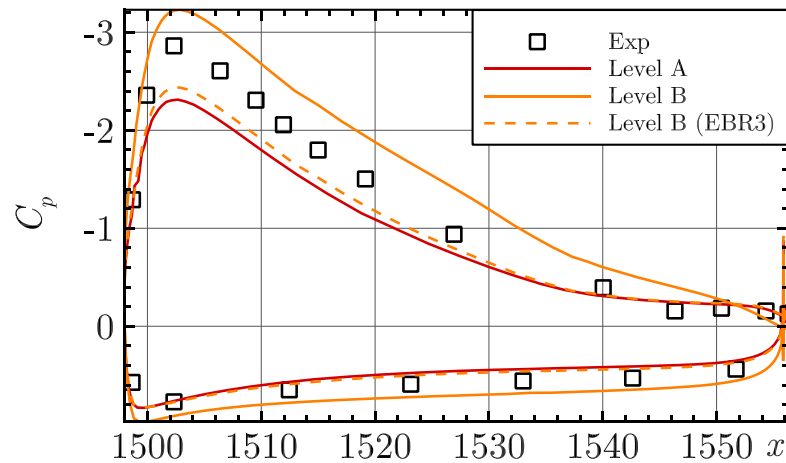
Сечение В



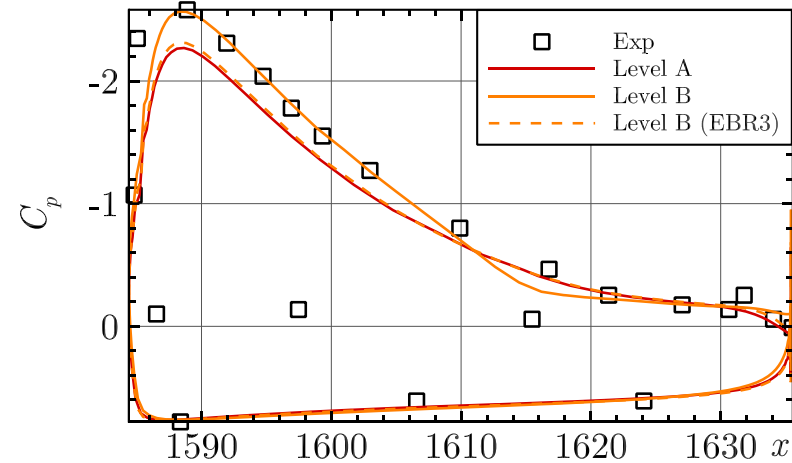
Сечение С



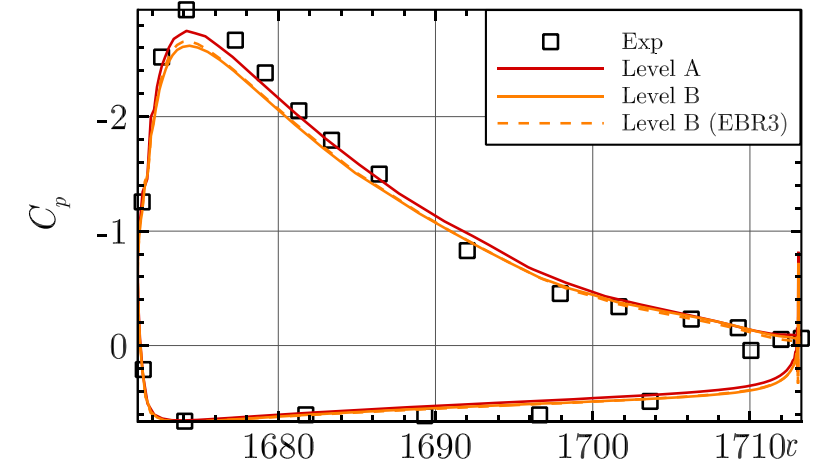
Сечение D



Сечение Е



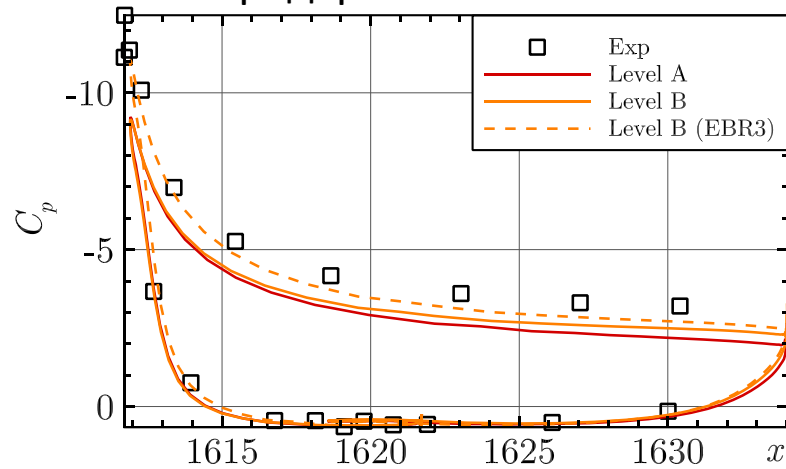
Сечение F



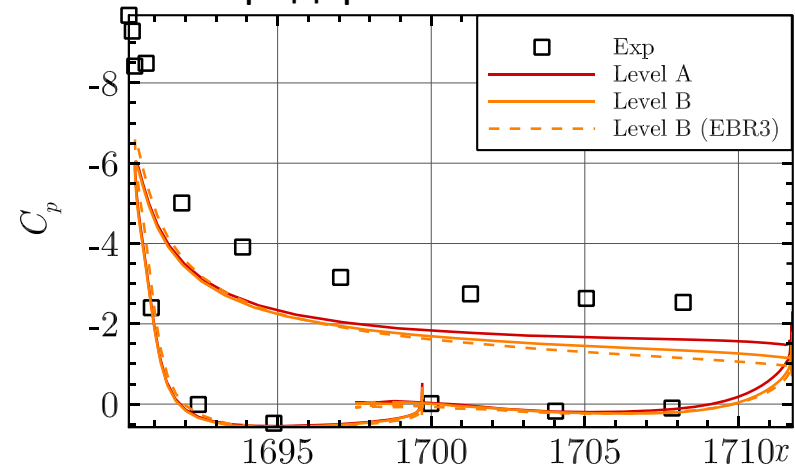


# $\alpha = 19.57^\circ$ : коэффициент давления на вблизи законцовки крыла

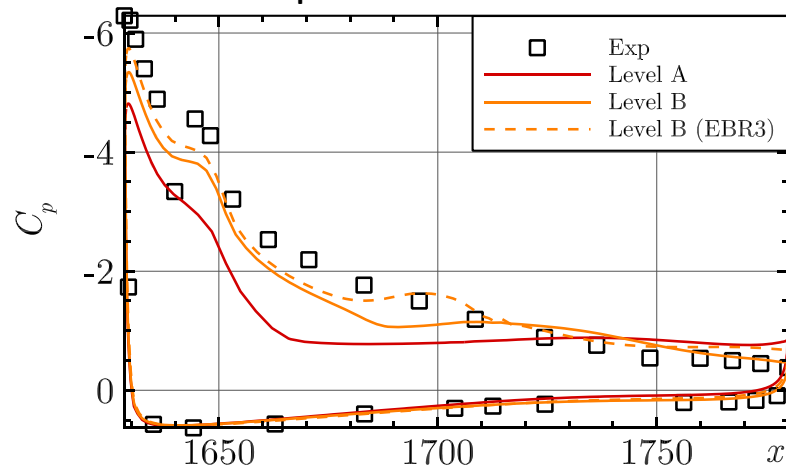
Предкрылок: Сечение G



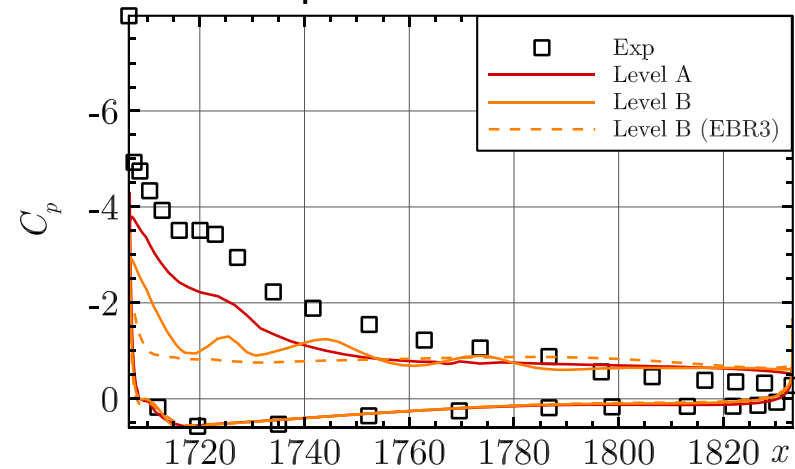
Предкрылок: Сечение H



Крыло: Сечение G



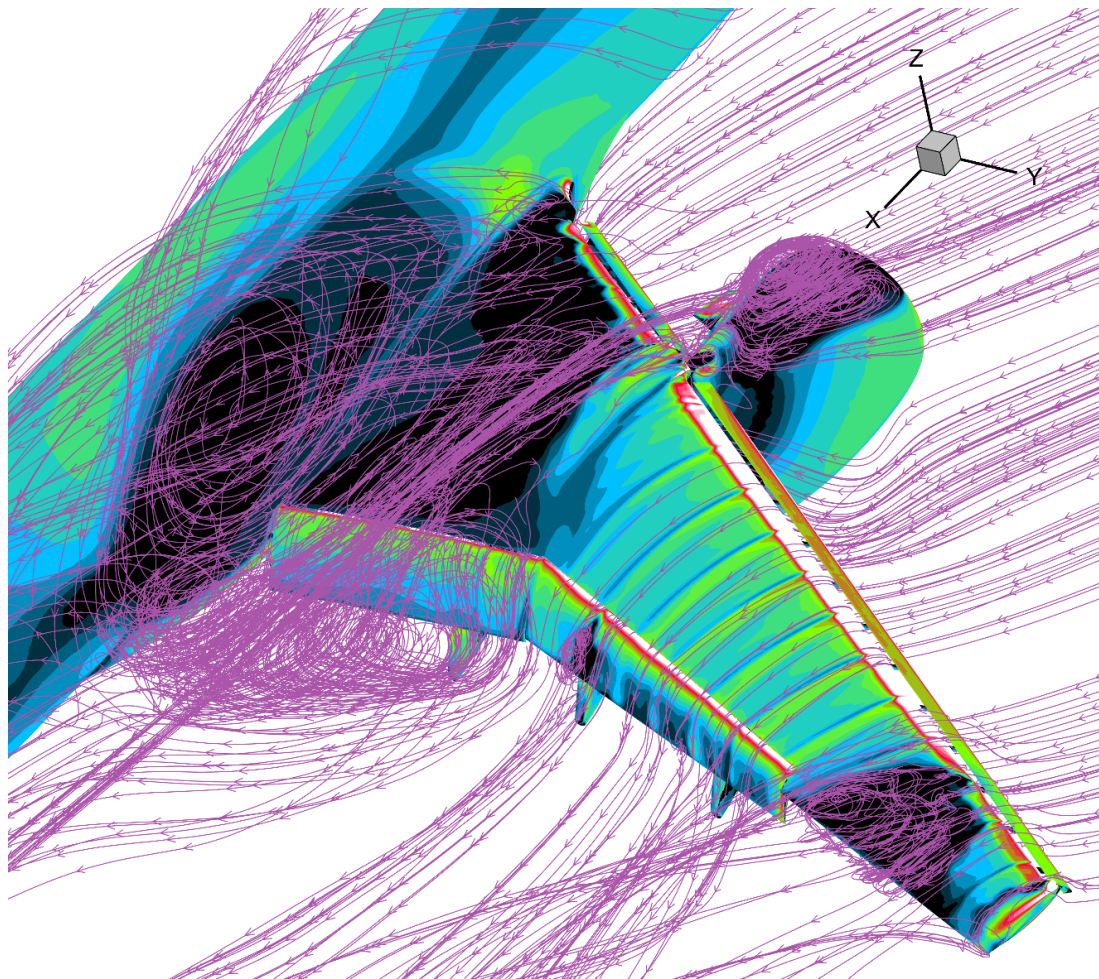
Крыло: Сечение H



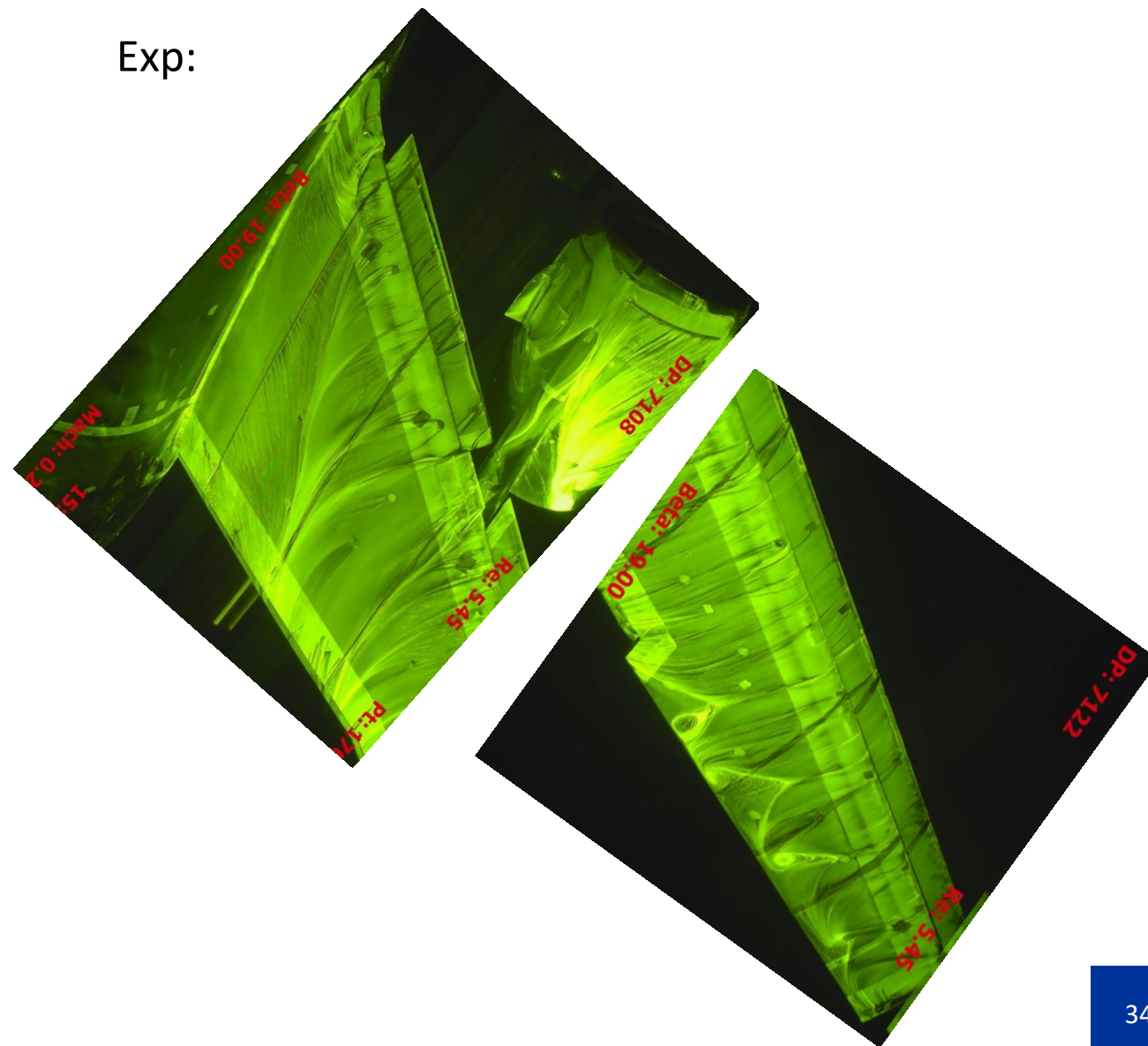


# $\alpha = 20.55^\circ$ : общий вид течения

NOISEtte, Level A:



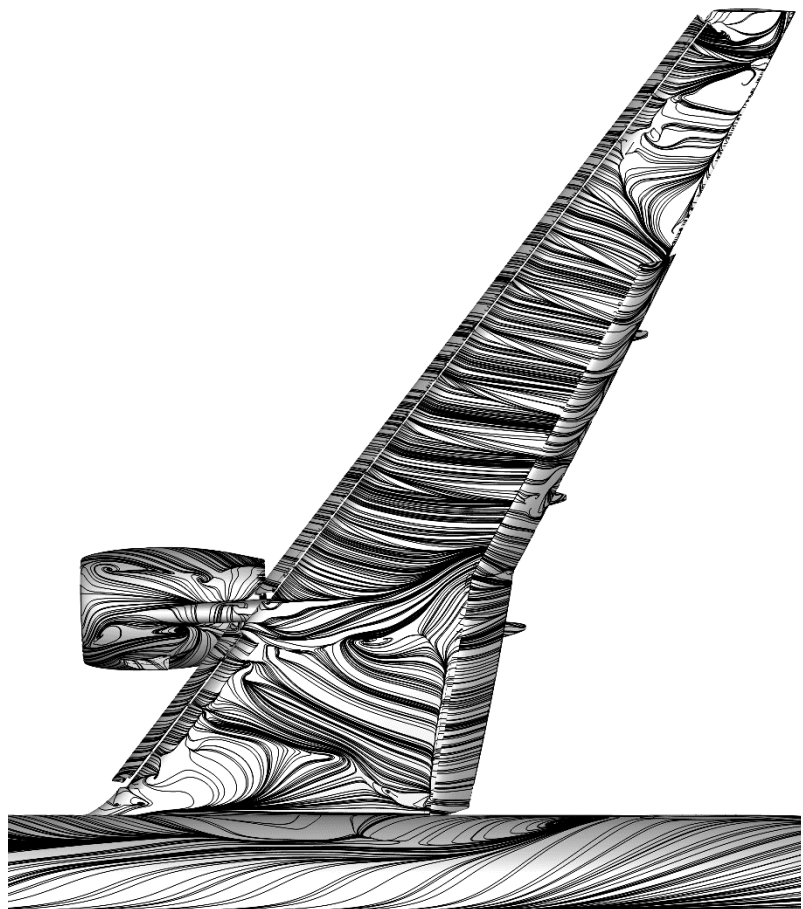
Exp:





# $\alpha = 20.55^\circ$ : линии тока

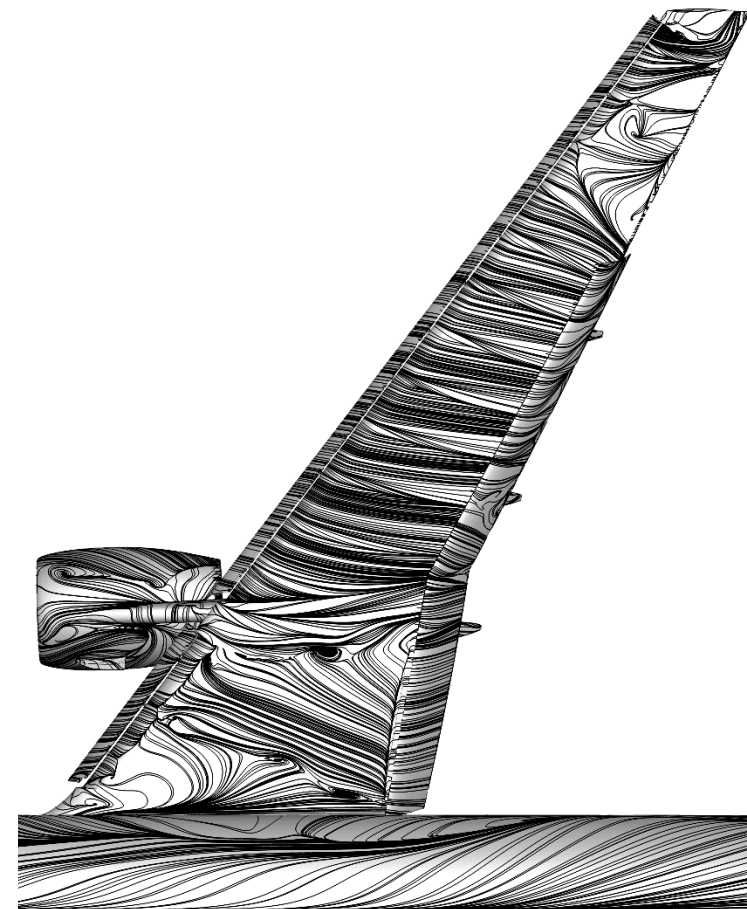
Level A:



Level B:

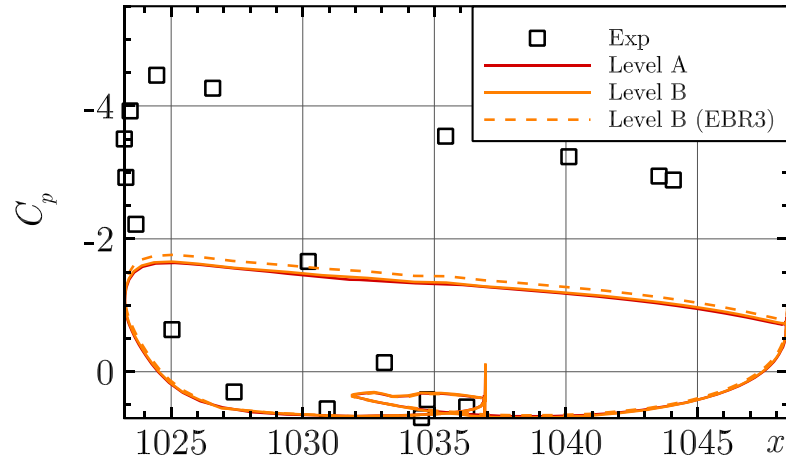


Level B (EBR3):

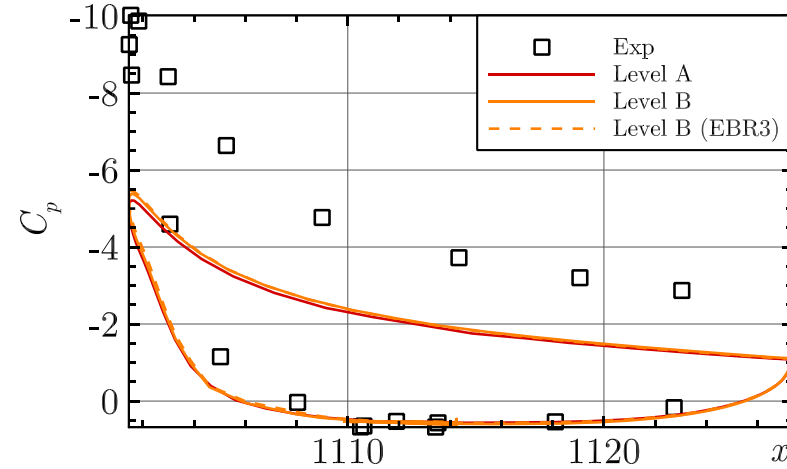


# $\alpha = 20.55^\circ$ : коэффициент давления на предкрылках

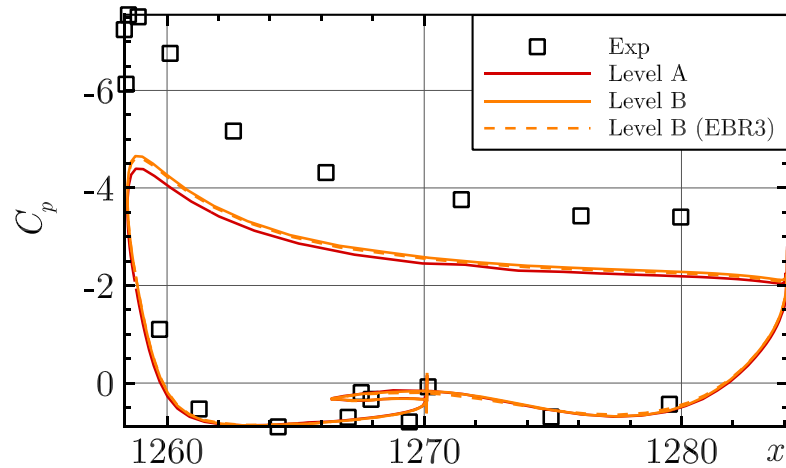
Сечение А



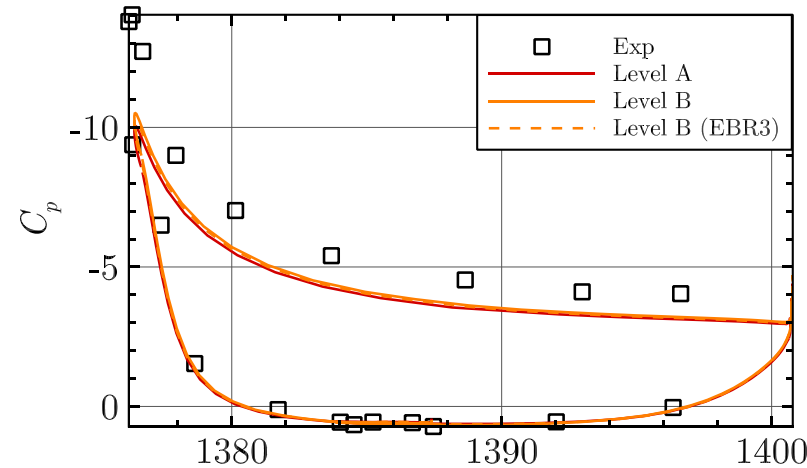
Сечение В



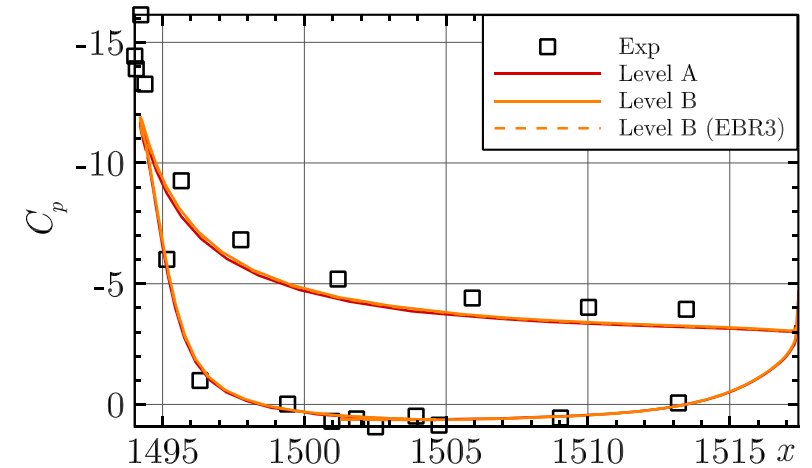
Сечение D



Сечение E

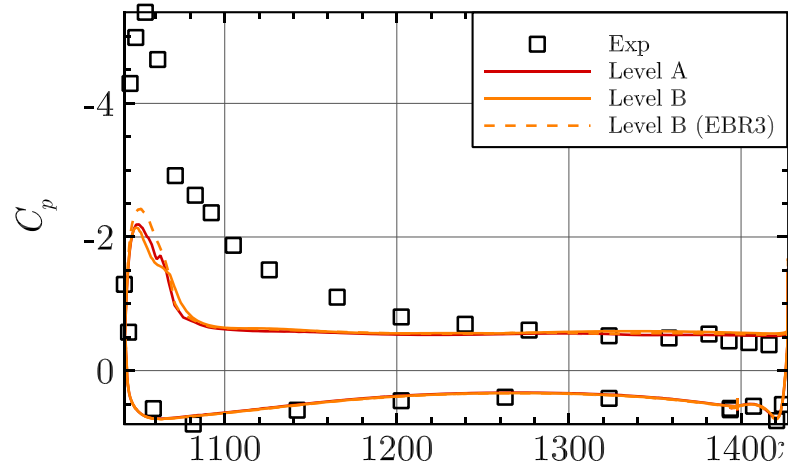


Сечение F

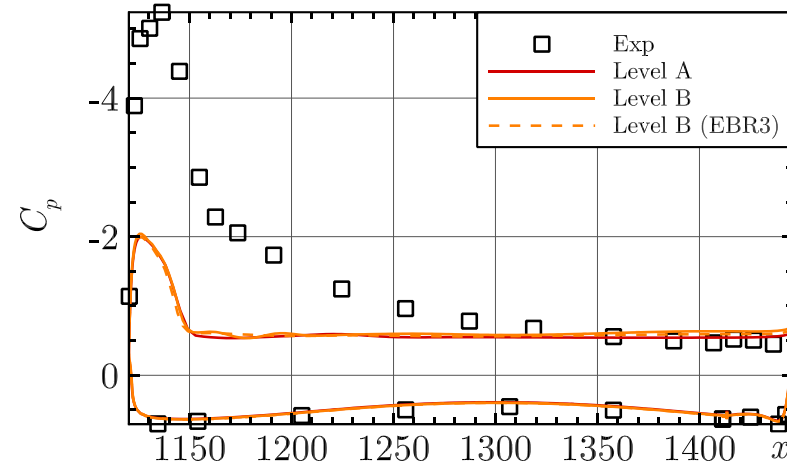


$\alpha = 20.55^\circ$ : коэффициент давления на крыле

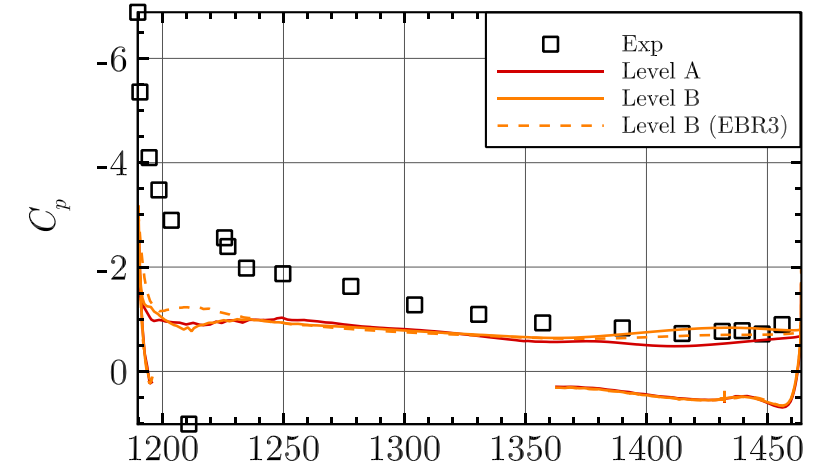
Сечение А



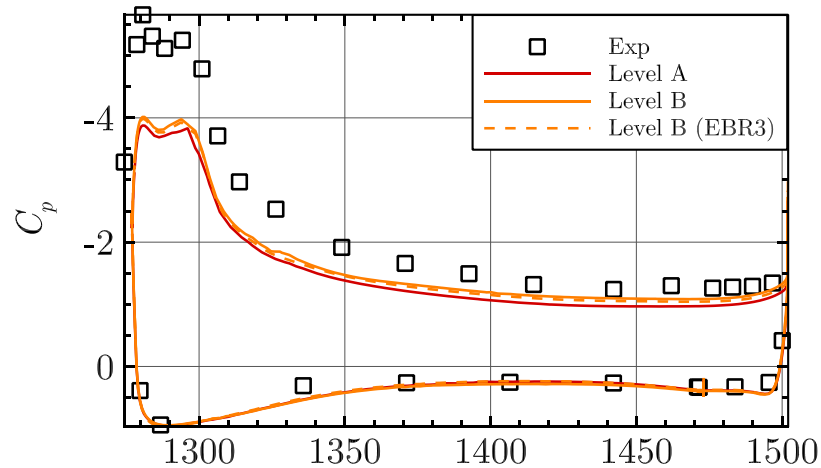
Сечение В



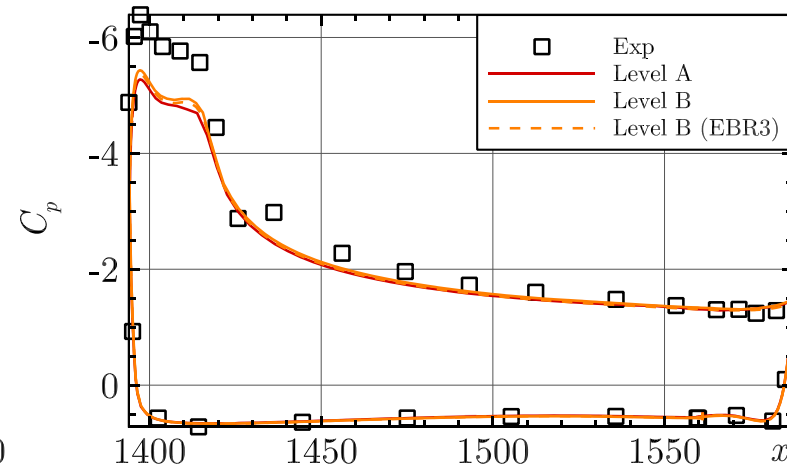
Сечение С



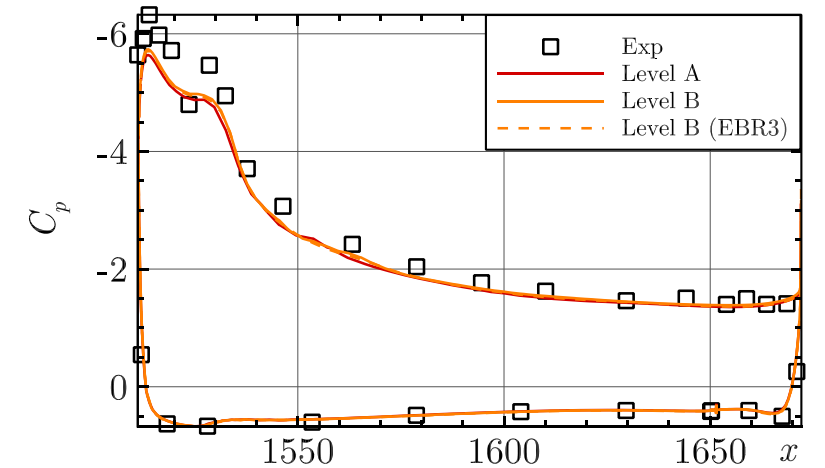
Сечение D



Сечение E



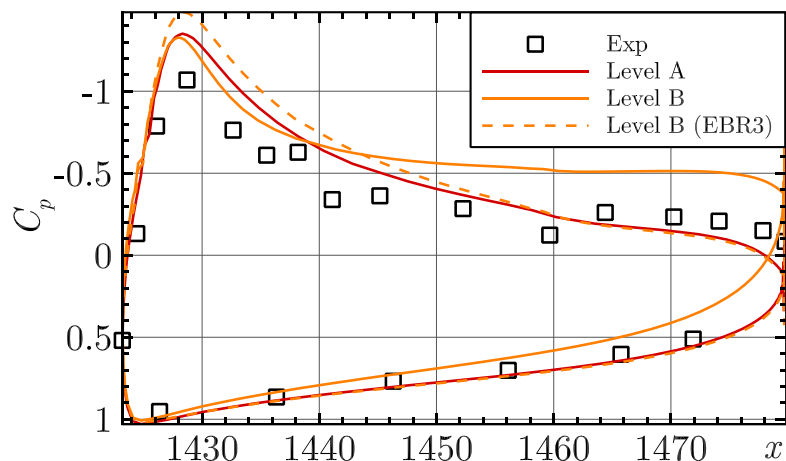
Сечение F



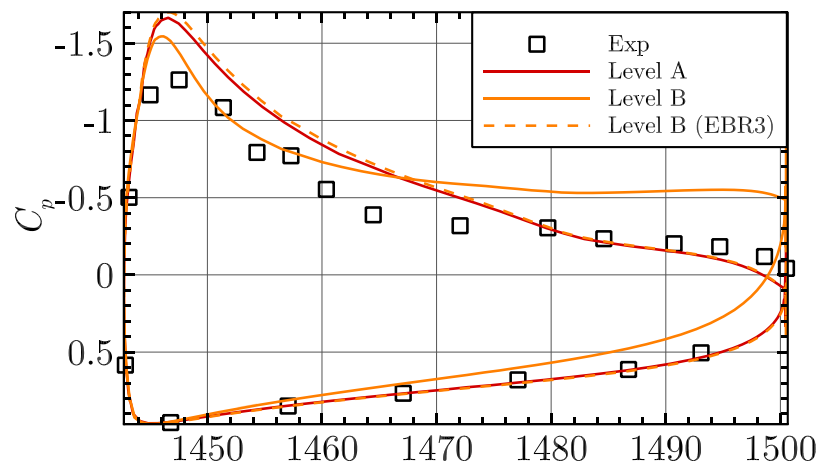


# $\alpha = 20.55^\circ$ : коэффициент давления на закрылках

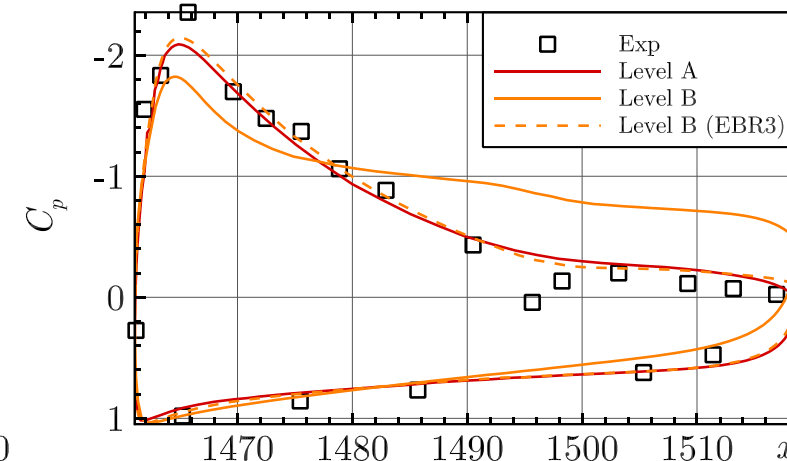
Сечение А



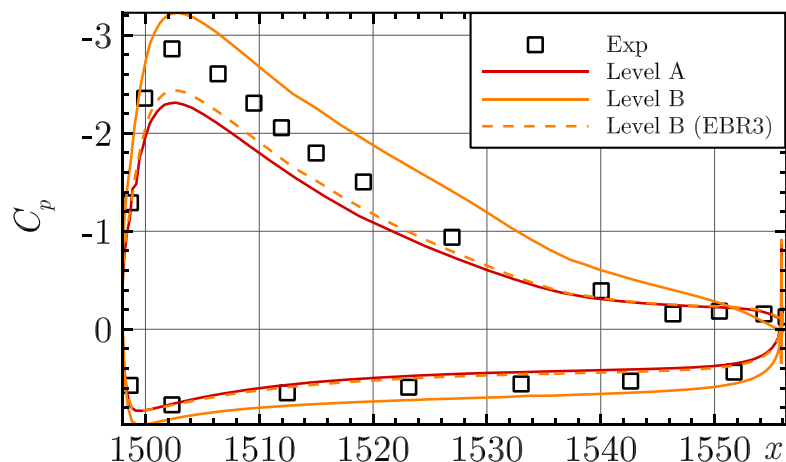
Сечение В



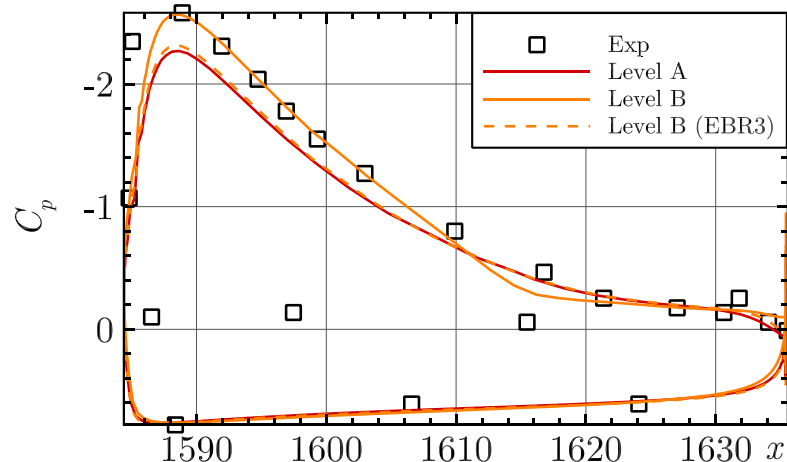
Сечение С



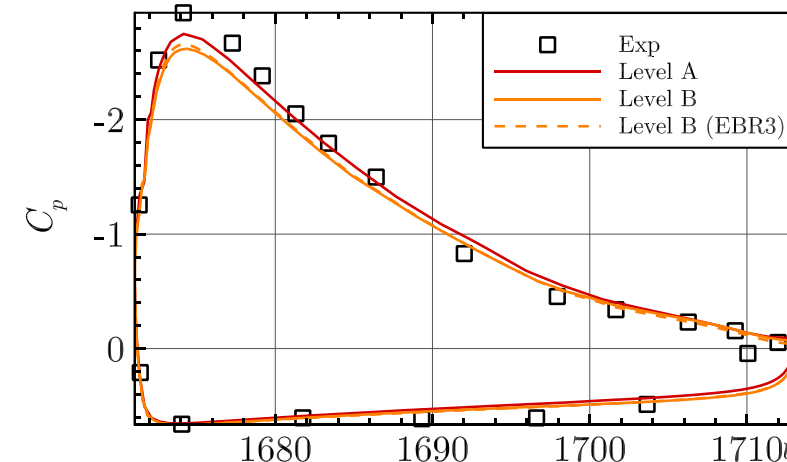
Сечение D



Сечение E

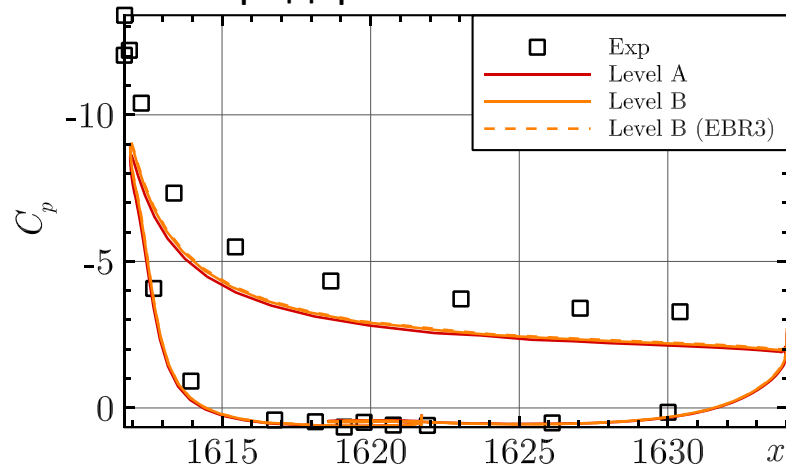


Сечение F

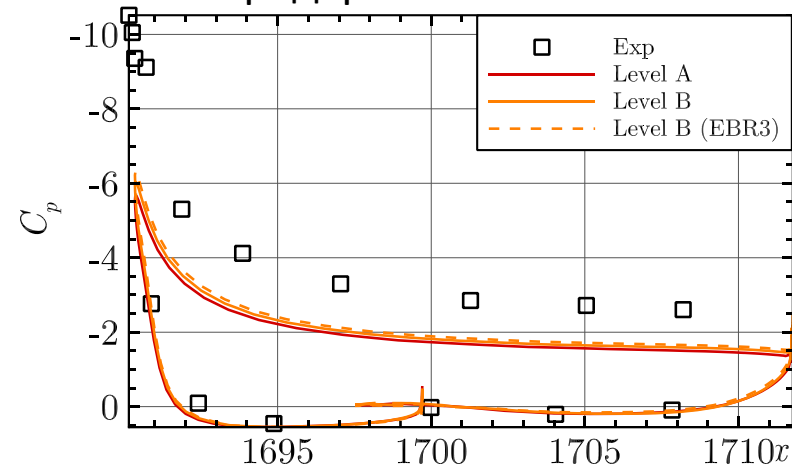


# $\alpha = 20.55^\circ$ : коэффициент давления наблизи законцовки крыла

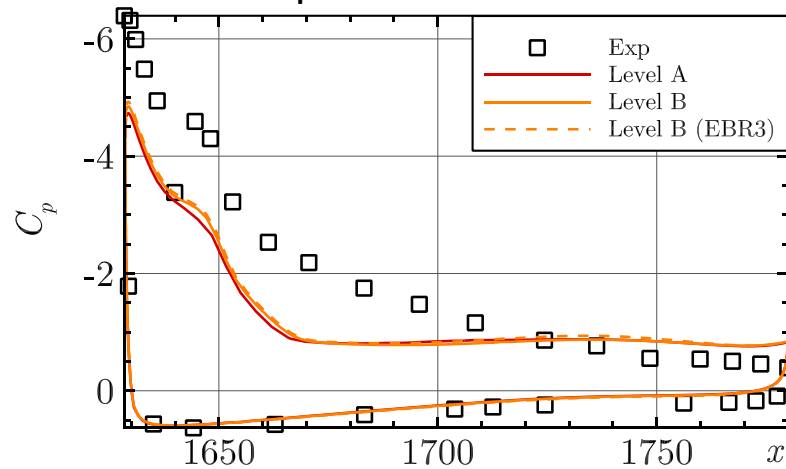
Предкрылок: Сечение G



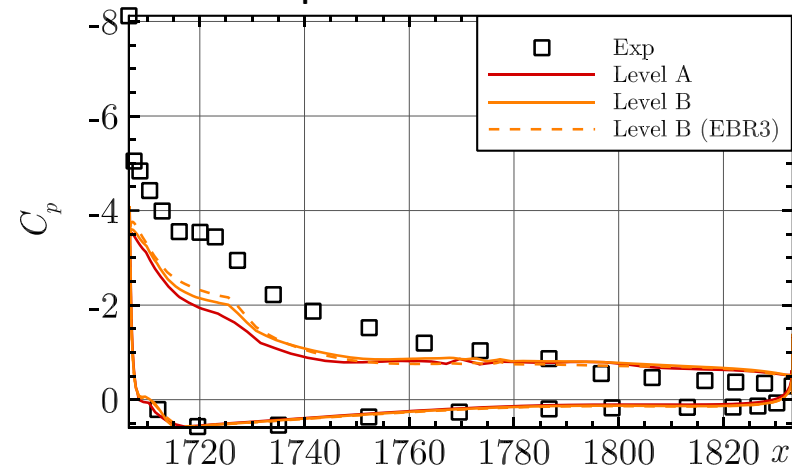
Предкрылок: Сечение H



Крыло: Сечение G



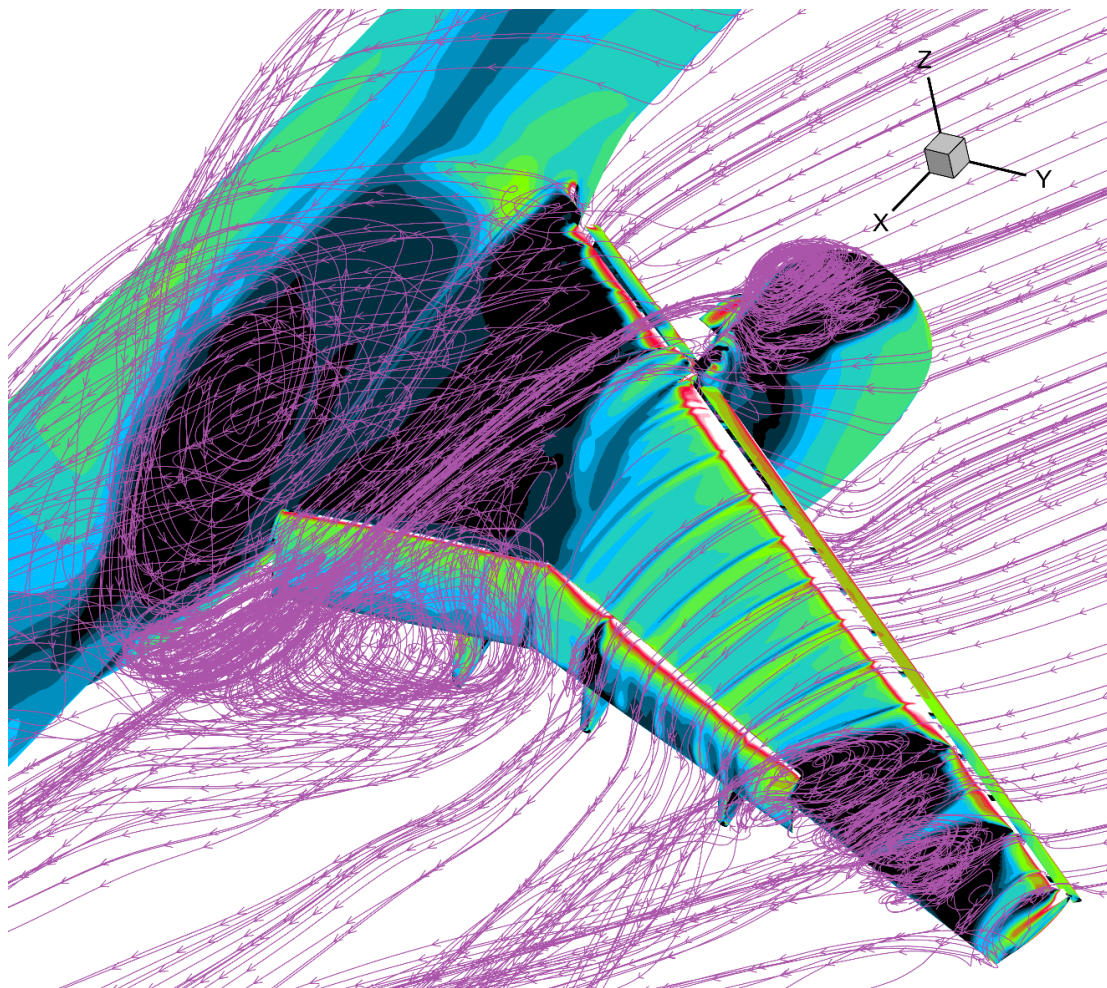
Крыло: Сечение H



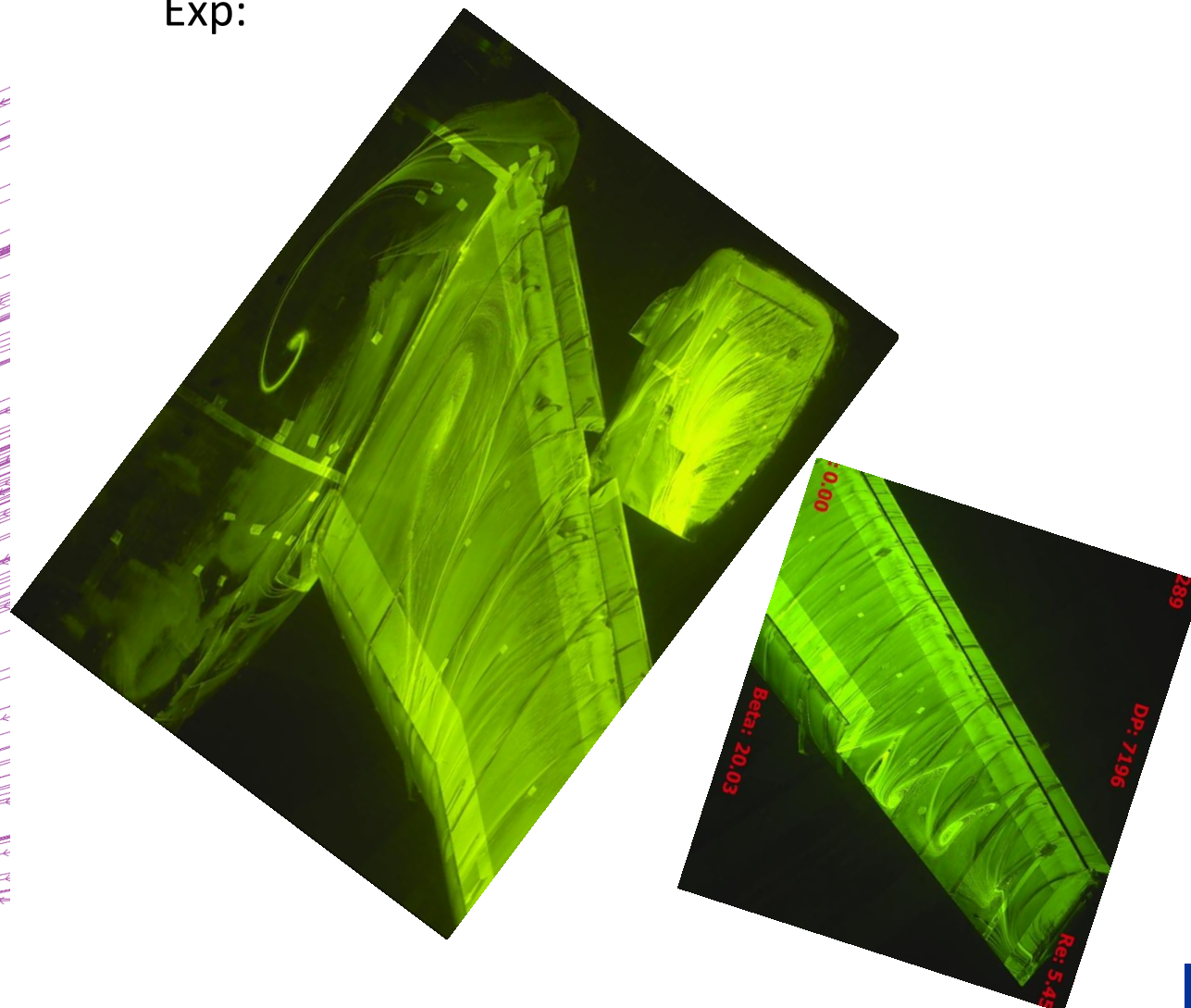


# $\alpha = 21.47^\circ$ : общий вид течения

NOISEtte, Level A:



Exp:





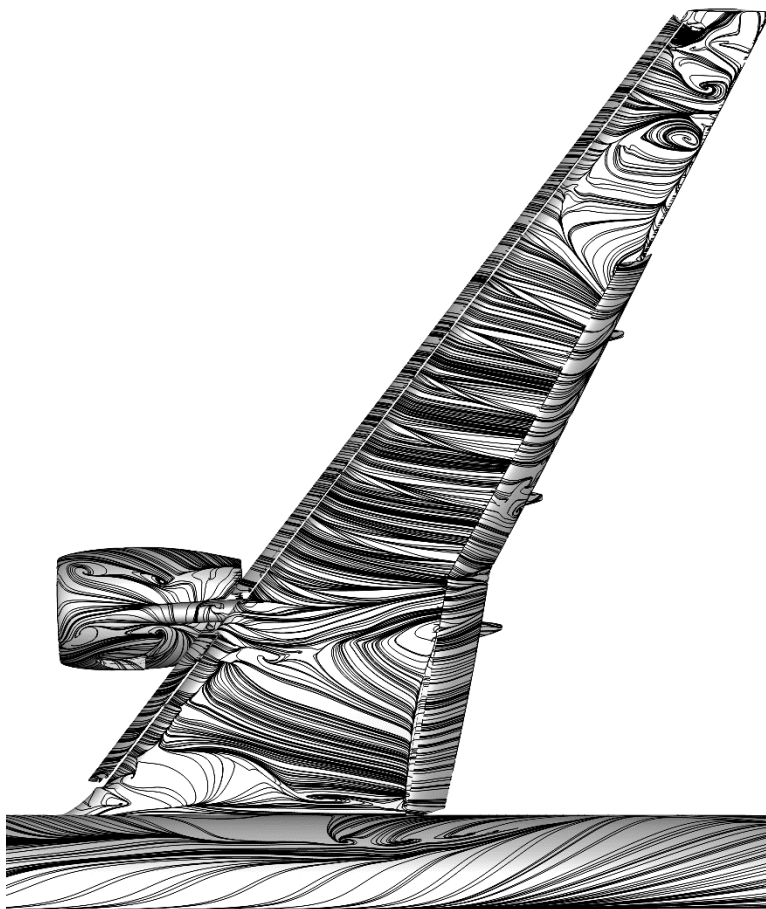


# $\alpha = 21.47^\circ$ : линии тока

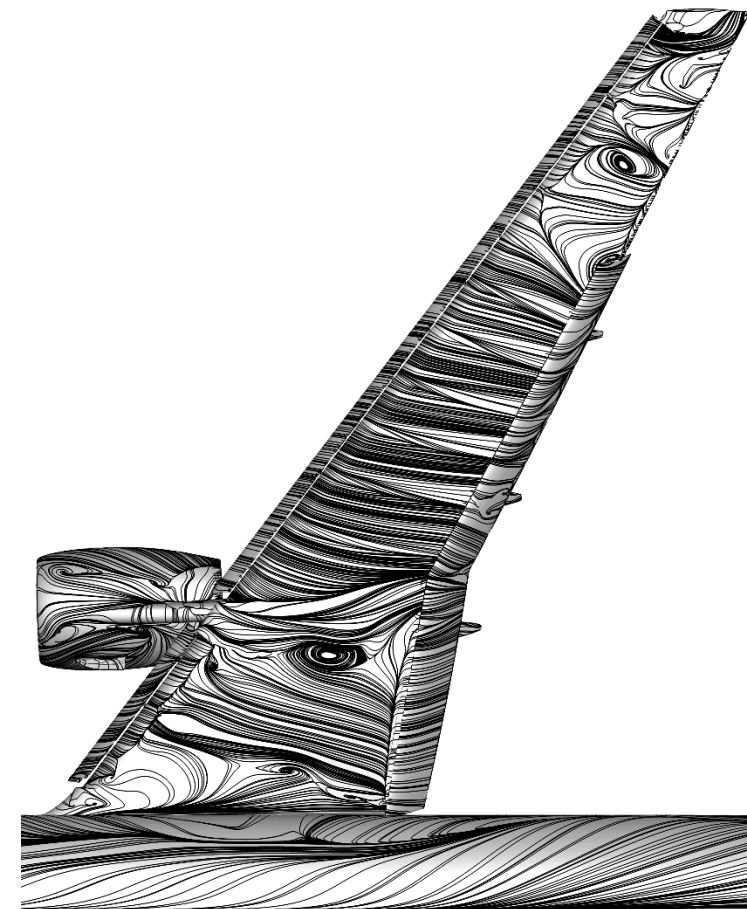
Level A:



Level B:

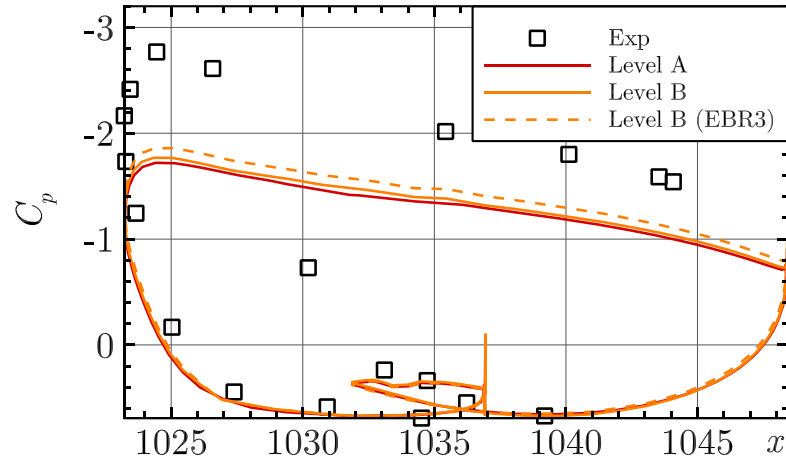


Level B (EBR3):

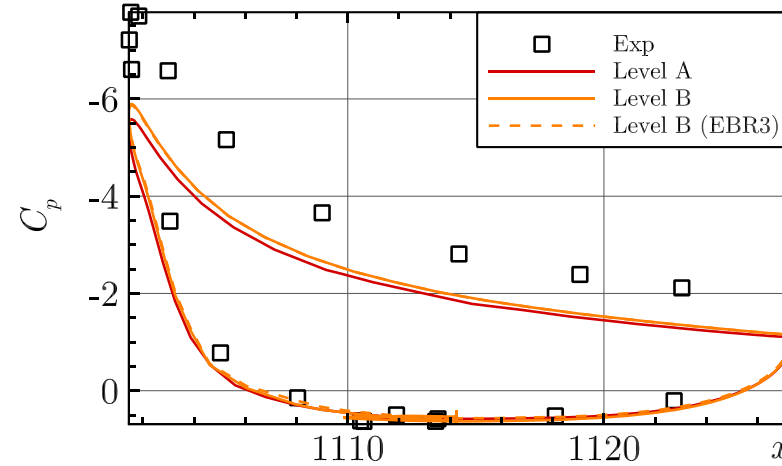


$\alpha = 21.47^\circ$ : коэффициент давления на предкрылках

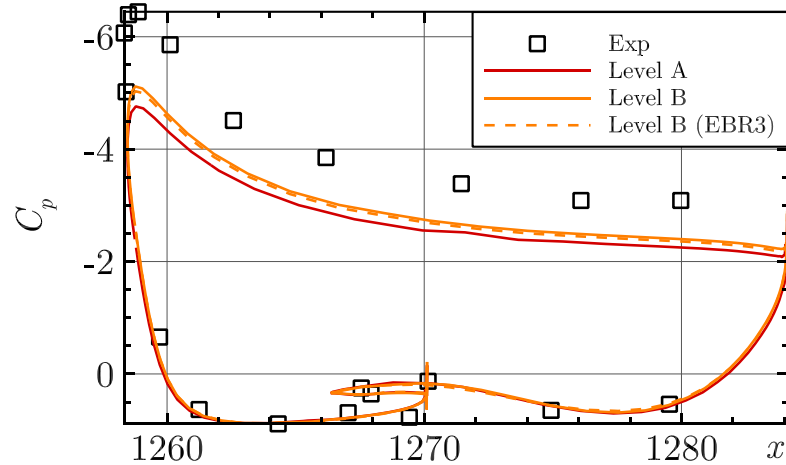
Сечение А



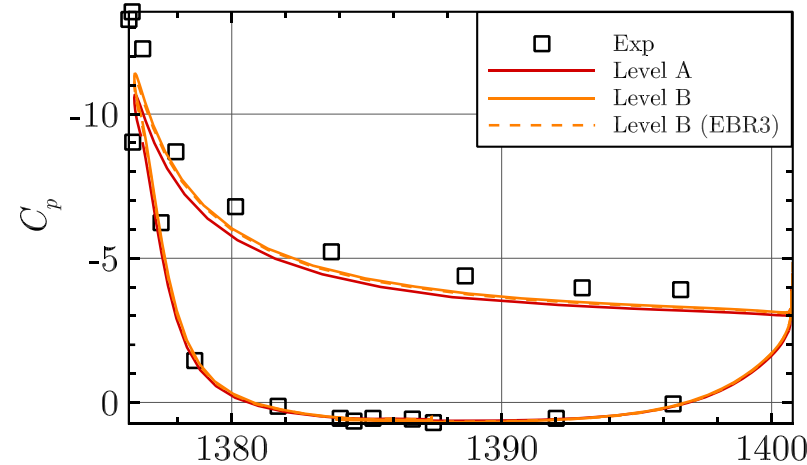
Сечение В



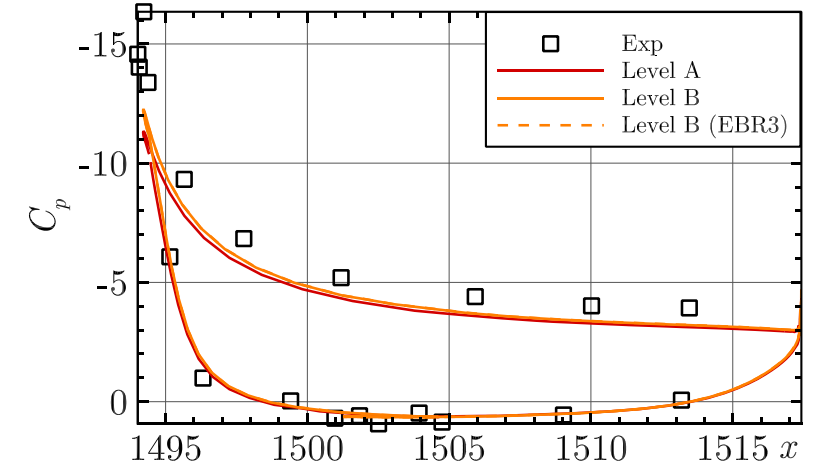
Сечение D



Сечение E



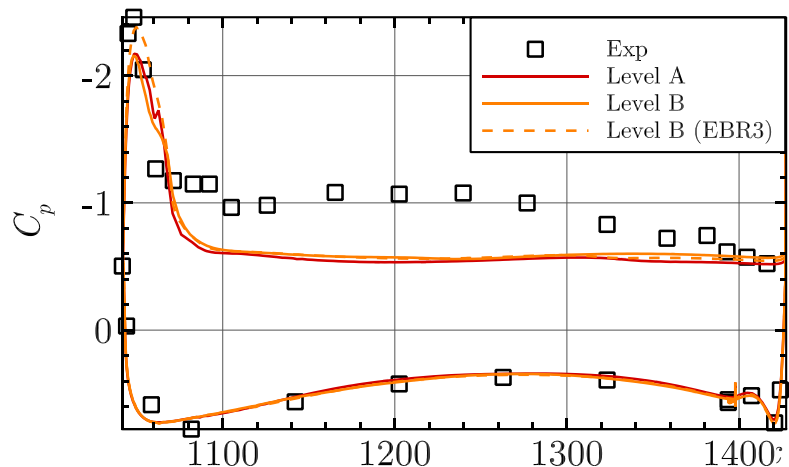
Сечение F



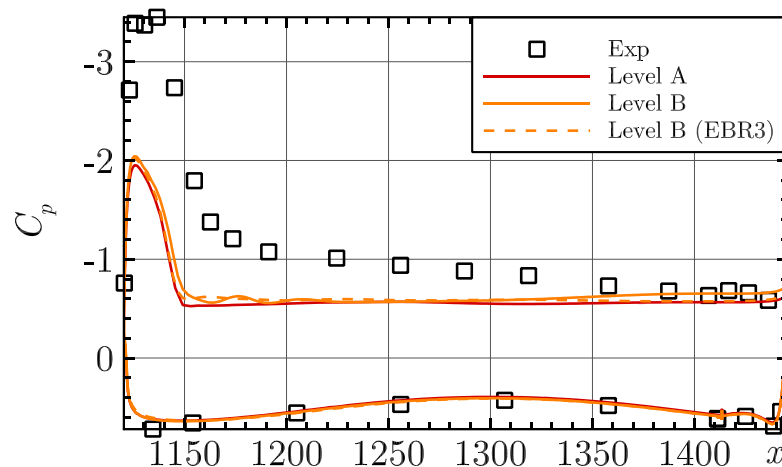


# $\alpha = 21.47^\circ$ : коэффициент давления на крыле

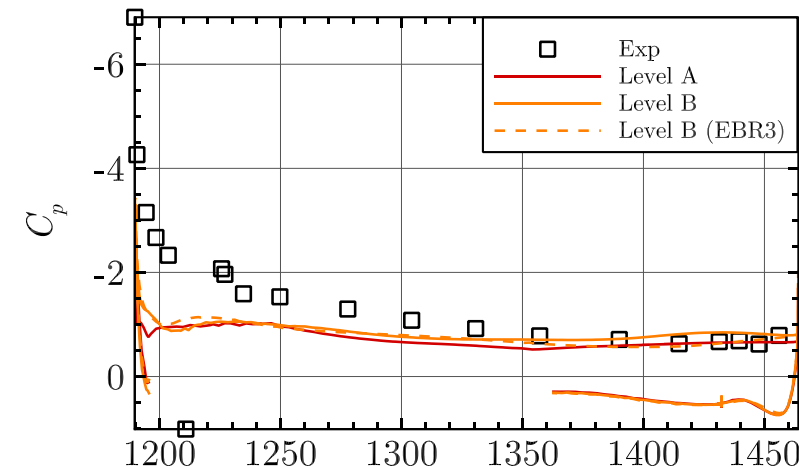
Сечение А



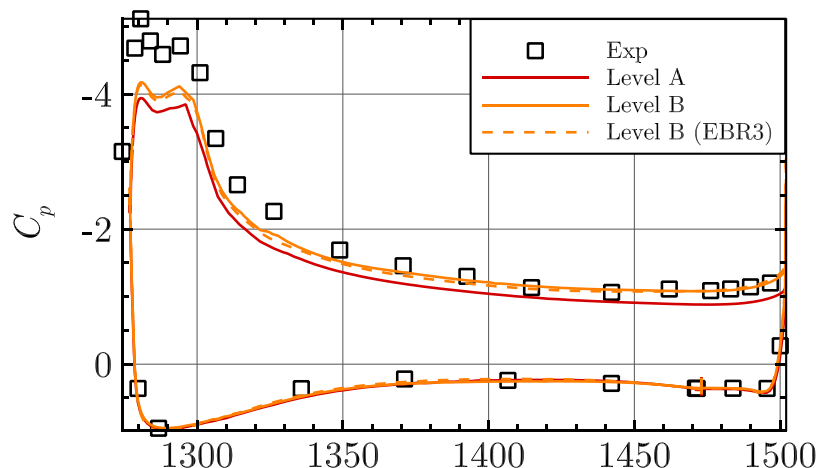
Сечение В



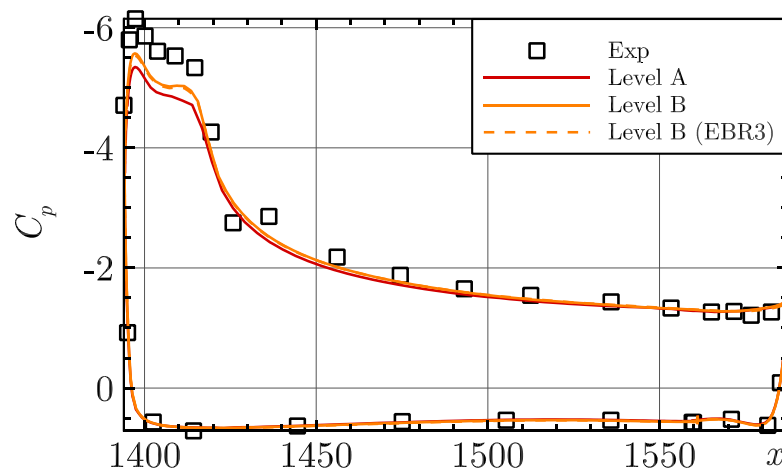
Сечение С



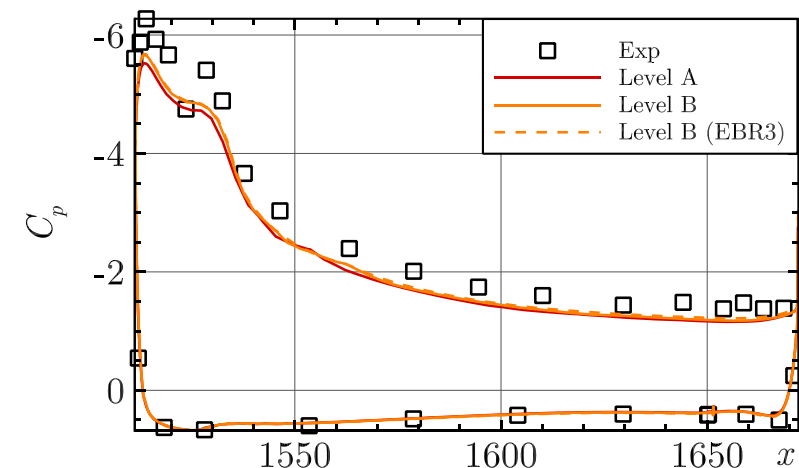
Сечение D



Сечение E

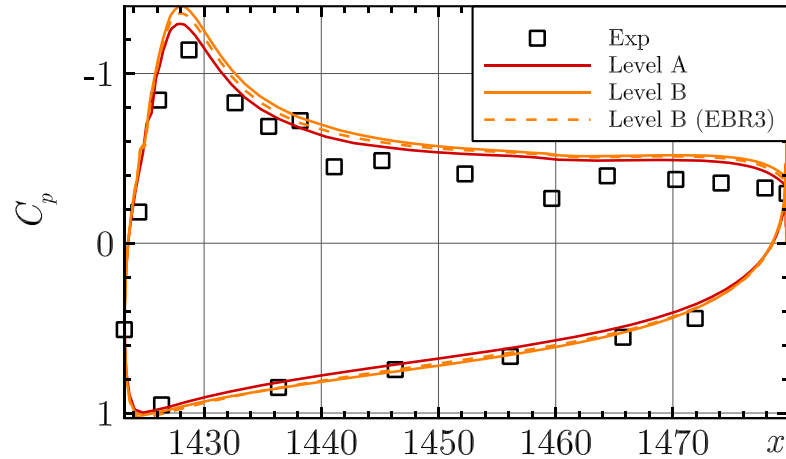


Сечение F

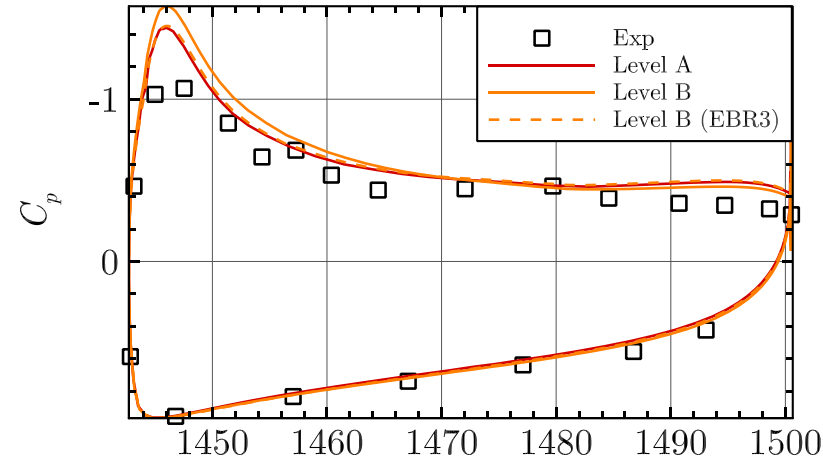


# $\alpha = 21.47^\circ$ : коэффициент давления на закрылках

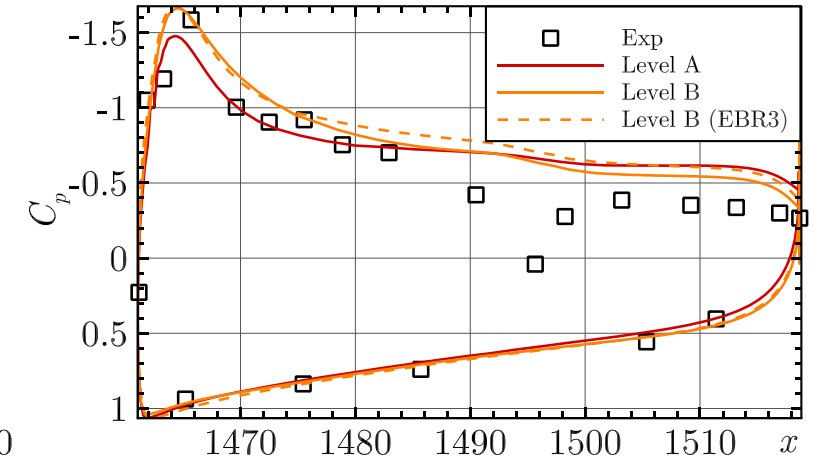
Сечение А



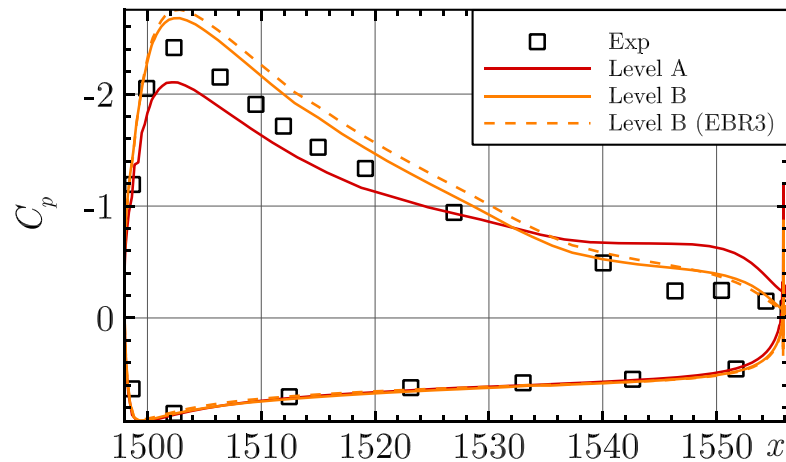
Сечение В



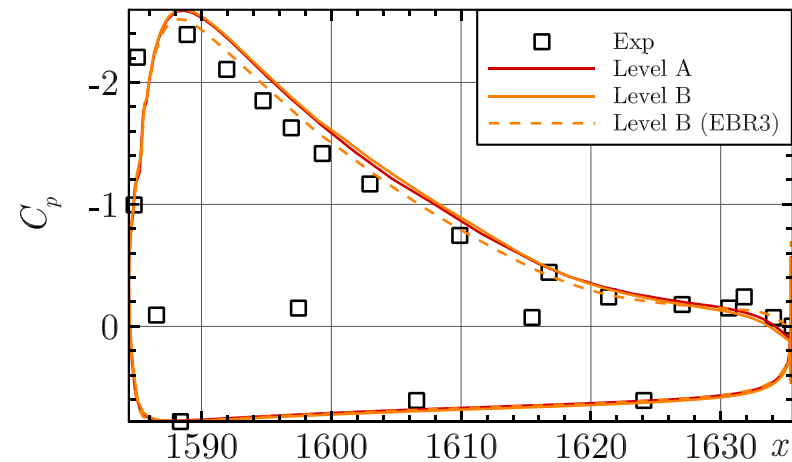
Сечение С



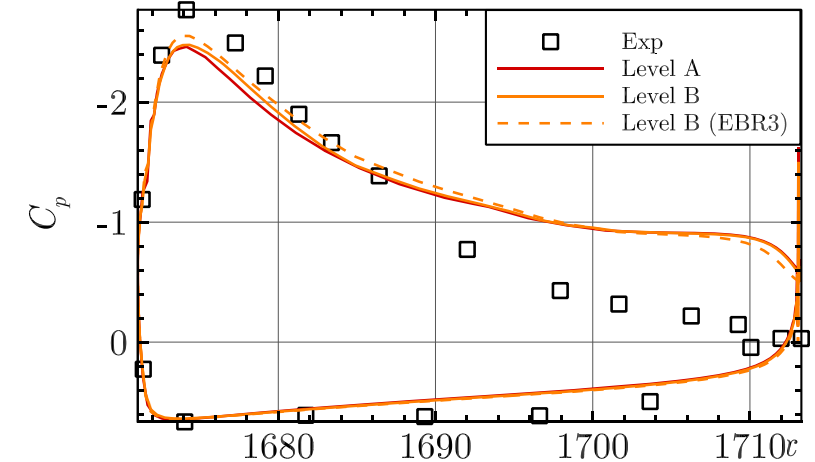
Сечение D



Сечение E

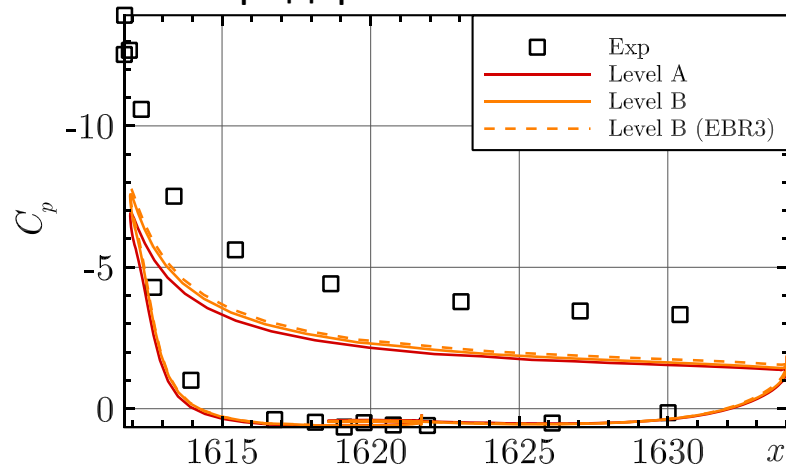


Сечение F

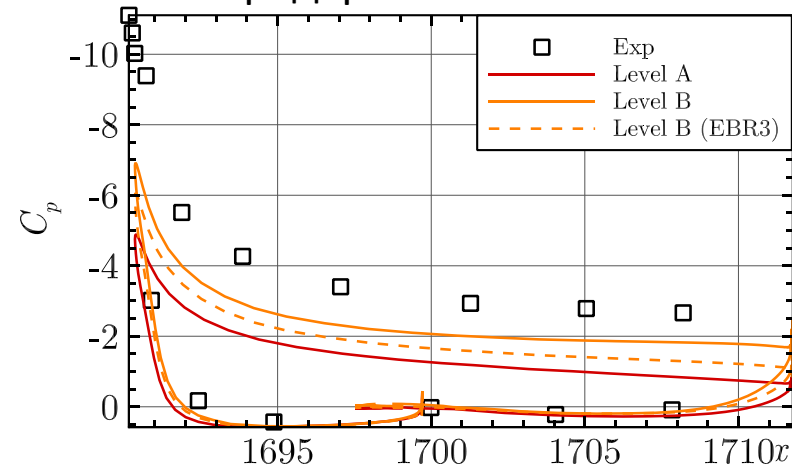


# $\alpha = 21.47^\circ$ : коэффициент давления на вблизи законцовки крыла

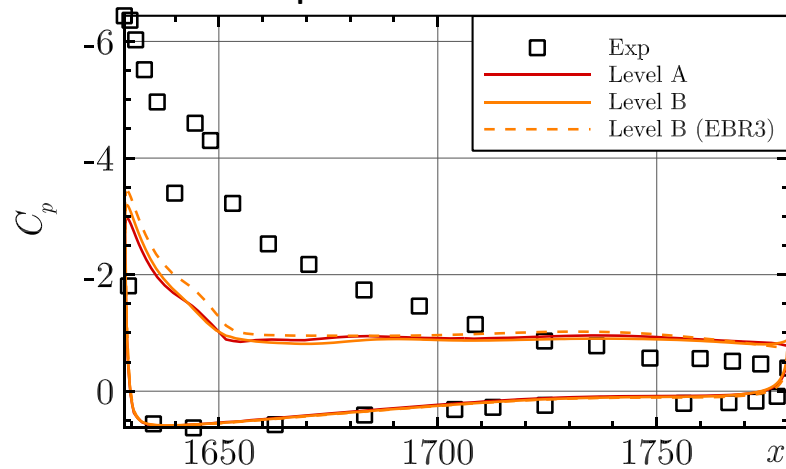
Предкрылок: Сечение G



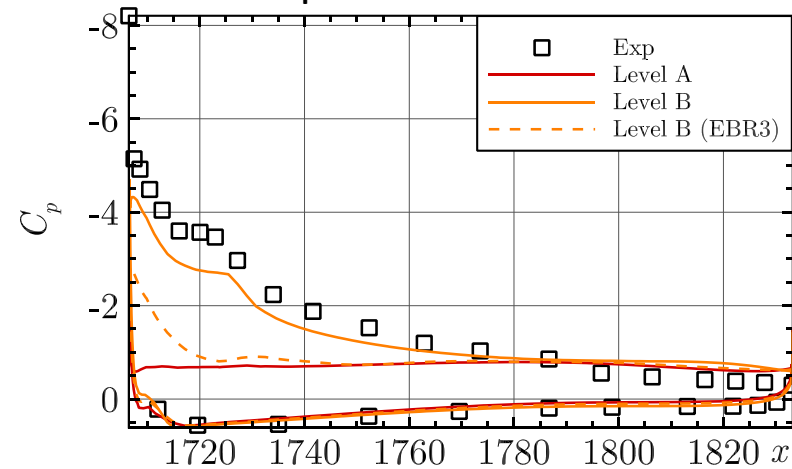
Предкрылок: Сечение H



Крыло: Сечение G



Крыло: Сечение H



## Краткое описание результатов (NOISEtte, RANS SA)

При небольших углах атаки RANS расчет по модели SA дает результат, соответствующий эксперименту.

На углах атаки  $11.29^\circ$  и выше вблизи законцовки крыла возникает ложный отрыв, который приводит к локальному понижению точности моделирования. Повышение сеточного разрешения не приводит к устранению данного отрыва.

При достижении критического угла атаки возникает дополнительный нефизичный отрыв вблизи фюзеляжа.

Характеристики физически обусловленного отрыва, получаемого в эксперименте на угле атаки  $21.47^\circ$ , не удается корректно воспроизвести в рамках используемого численного подхода.

## Краткое описание результатов, получаемых при помощи других подходов и кодов

Презентации с описываемыми результатами можно найти на сайте воркшопа: [hiliftpw.larc.nasa.gov](http://hiliftpw.larc.nasa.gov). Изложенные результаты не являются окончательными, воркшоп продолжается.

Отсутствие ложного отрыва около законцовки крыла в рамках RANS подхода демонстрируют коды, использующие структурированные перекрывающиеся сетки: LAVA, CHAMPS, OVERFLOW. Среди конечно-объемных вершинно-центрированных кодов данный отрыв отсутствует у CFD++.

Коды, использующие RANS с адаптацией, гибридные RANS-LES и WMLES методы, в целом оказываются ближе к эксперименту, чем RANS на фиксированной сетке, особенно на около критических и посткритических углах атаки, хотя также могут быть подвержены появлению ложных отрывов или невозникновению физически обусловленных. Увеличение размеров сеток для данных методов приводит к значительному улучшению численных результатов.

Наблюдается зависимость получаемых решений от начальных данных: постепенное увеличение угла атаки дает более близкий к эксперименту результат, нежели старт со свободного потока.

Спасибо за внимание!

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (Проект № 19-51-80001, акроним SONG, по Рамочной программе BRICS STI) и выполнена с использованием гибридного суперкомпьютера K60, установленного в Центре коллективного пользования ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, а также оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.