



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ
ИНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ - СЛИВЕН

Катедра „Механика, машиностроене и топлотехника“

маг. инж. Иван Антонов Петров

ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ПОВИШАВАНЕ ЕФЕКТИВНОСТТА НА ГОРЕНЕ
НА ИНЖЕКТИРАНА ЗАВЪРТЯНА СТРУЯ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област - 5. Технически науки
Професионално направление - 5.4. Енергетика
Научна специалност - Теоретична топлотехника

Научен ръководител: доц. д-р инж. Невен Йорданов Кръстев

Сливен 2025г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Механика, машиностроене и топлотехника“ към Инженерно - педагогически факултет - Сливен на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 15.09.2025 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 22.01.2026 г. от 14:00 часа в зала 1204 на Инженерно - педагогически факултет - Сливен на Технически университет - София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.4-20/24.09.2025 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Проф. д-р инж. Койчо Тончев Атанасов - Председател
2. Проф. д-р инж. Ангел Костадинов Терзиев - Научен секретар
3. Проф. д-тн. инж. Иван Славейков Антонов
4. Проф. д-р инж. Генчо Стойков Попов
5. Доц. д-р инж. Борис Звездов Костов

Рецензенти:

1. Проф. д-р инж. Ангел Костадинов Терзиев
2. Проф. д-тн. инж. Иван Славейков Антонов

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в Учебен отдел на Инженерно - педагогически факултет - Сливен на ТУ- София.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Механика, машиностроене и топлотехника“ на Инженерно - педагогически факултет - Сливен. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора.

Автор: маг. инж. Иван Антонов Петров

Заглавие: Възможности за повишаване ефективността на горене на инжектирана завъртяна струя

Тираж: 30 броя

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Повишаването на енергийната ефективност при съвременните горивни устройства е фокусирано върху постигането на по-висока производителност и топлинна ефективност и по-стриктен контрол на изходящите газове, чрез които се губи отпадна топлина и в които се съдържат вредни за атмосферата въглеродни и азотни окиси, получени при непълното изгаряне на горивото в горивната камера. В тази връзка е перспективно разработването и конструирането на нови устройства и системи, както и усъвършенстване на съществуващи такива, осигуряващи най-пълно изгаряне на горивото, както и намаляване на емисиите на вредни вещества във въздуха.

Първостепенна задача е възможността за активно въздействие върху горивния процес с цел оптималното му управление. Оптимизирането на горивните устройства, всъщност означава подходящ избор на съответните режимни и конструктивни параметри, от които зависи както ефективността на използване на газовото гориво, така и количеството вредни емисии отделяни в околната среда.

В тази връзка е направено проучване и са извършени експериментални и числени изследвания относно възможността за определяне на влиянието на основни режимни и конструктивни параметри върху ефективността на горене на инжектирана завъртяна струя, което е предпоставка за ефективно въздействие върху горивния процес с цел неговото интензифициране.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Основната цел на дисертационен труд е експериментално и числено изследване на основни параметри влияещи върху ефективността на изгаряне на газово гориво в условията на инжектирана завъртяна струя.

За постигане на поставената цел е необходимо да се решат следните задачи:

- Да се извърши регресионен анализ на експериментални данни при изследване работата на инжекционна вихрова горелка и да се предложи подход за изучаване влиянието на режимните и конструктивни параметри, върху ефективността на горене на инжектирана завъртяна струя;
- Да се създаде експериментална инсталация за изследване на газодинамиката на инжектирана завъртяна струя;
- Да се изследват експериментално основни закономерности на газодинамиката на инжектирана завъртяна струя в ограничено пространство при изотермични условия;
- Да се реализират компютърни симулации за определяне възможността за въздействие върху ефективността на процеса горене, като се изследват основни топлообменни характеристики в началния участък на горящия факел и граничните повърхности на смесителя;

- Да се валидират числените модели с получените експериментални резултати;
- Да се изследва и анализира влиянието на плътността на топлинния поток през цилиндричната повърхност на смесителната камера върху процеса на образуване на въглеродни оксиди.

Научна новост

Реализирани са експериментални и числени изследвания, от които са получени потвърдителни резултати за въздействието на завъртяното течение върху образуване на въглеродни оксиди в ограничено пространство.

Практическа приложимост

Получените резултати от експерименталните и числени изследвания и изведените зависимости могат да бъдат използвани при проектирането или реконструкция на горивни устройства, като се търси оптимален вариант между пълнота на горене и образуване на вредни емисии.

Апробация

Дисертационният труд е докладван и обсъден на катедрен съвет на катедра „Механика, машиностроене и топлотехника“ към Инженерно - педагогически факултет - Сливен на ТУ-София. Работата по дисертацията е докладвана на:

- Национална конференция с международно участие „Образователни технологии 2022“, Каварна.
- Национална конференция с международно участие „Инженерни и природни науки 2023“, Созопол.
- Юбилейна XXV конференция за „Студентско научно творчество 2024“, Бургас.
- Научна Конференция на Русенски Университет „Ангел Кънчев“ и Съюз на учените – Русе“, 2024г.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 6бр. научни статии, от които 1бр. самостоятелна и 5бр. в съавторство.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от **153** страници и **47** страници Приложения към него, като включва въведение, **7** глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо **175** литературни източници, като **104** са на латиница и **56** на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо **152** фигури и **13** таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ЕКОЛОГИЧЕН И ИКОНОМИЧЕСКИ АНАЛИЗ НА ГАЗОГОРЕЛЪЧНИ УСТРОЙСТВА

1.1. Екологичен и икономически аспект.

През последните години бяха разработени множество глобални политики и регулации, за намаляване на емисиите на парникови газове. Парижкото споразумение, одобрено от 195 държави през 2015г., е най-добрият пример, който има за цел „Да задържи повишаването на средната глобална температура под 2°C над индустриалните нива и да продължи усилията за ограничаване на повишаването на температурата до 1,5°C над индустриалните нива, като признава, че това значително ще намали рисковете и въздействията от изменението на климата“ [136], [140].

Европа посочва в „Пътната карта за постигане до 2050г. на конкурентоспособна икономика с ниска въглеродна интензивност“, че вътрешните емисии, следва да бъдат намалени с 80 % до 2050г. в сравнение с 1990г., като секторите на енергетиката и промишлеността са тези с най-големи необходими намаления [136], [122].



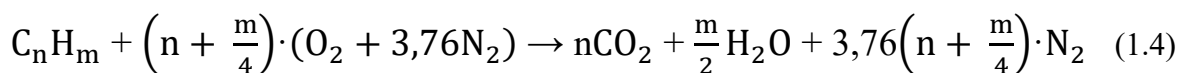
Фиг. 1.5. Емисии на парникови газове. Данни, прогнози и цели за ЕС (в еквивалент на милиони тонове CO₂) [18].

Екологичните, икономическите и техническите характеристики на горивните устройства са взаимносвързани и зависят, както от режимните и конструктивни параметри, така и от свойствата и пълнотата на горене на конвенционалните горива, с цел повишаване коефициента на полезно действие на горивните агрегати. Като това е обосновка за провеждане на натурни и числени експериментални изследвания.

1.2. Видове стехиометрия, турбулентност и струйни течения при процеса горене.

Горенето може да се определи [132] като необратимо развитие на реактивна смес към нейното равновесно състояние. Тази еволюция се състои от набор от химични реакции (ефективни молекулни сблъсъци), които позволяват да се опише крайната реакция на окисление на гориво (обикновено въглеродород) от окислител (кислород във въздуха).

По-общо, стехиометричното окисление на въглеродород C_nH_m от O₂ във въздуха се описва с общата реакция [132]:

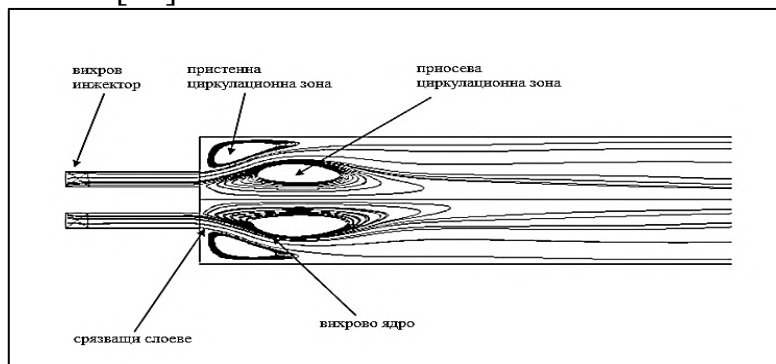


В зависимост от степента на смесване на въздуха с горимия газ до изхода му от горелката се различават следните начини на изгаряне [9], [37]:

- Смесено горене - когато горимия газ е предварително частично смесен с въздуха, но количеството на този въздух е недостатъчно за пълно изгаряне;
- Кинетично горене - когато се изгаря предварително подготвена, еднородна газо-въздушна горима смес;
- Дифузно горене - когато горимия газ и въздуха предварително не са смесени.

Първите изследвания на турбулентността са направени през 1883 г. от английския учен О. Рейнолдс. В труда си публикуван през 1895г. предлага следната хипотеза, намерила широко приложение и използвана масово в изследванията през последните години: Моментната стойност на скоростта, налягането и останалите параметри на турбулентното течение се представят като сума от осреднените по време стойности плюс пулсационните им съставлящи [4], [5].

В горивната техника едно от най-важните и полезни качества на завъртените течения е съществуването на циркуляционна зона. Тя играе съществена роля като стабилизатор на горивния процес, създава обратен ток с продукти от горенето и област от течението, в която понижената му скорост се изравнява със скоростта на разпространение на фронта на пламъка. Това води до скъсяване на разстоянието до зоната на стабилизирано горене и на дължината на факела на пламъка. Освен това фронтът на пламъка може да се управлява с регулиране на разширението му чрез въздействие върху степента на въртене [4]. На фигура 1.7 са показани приосеви и пристенни циркуляционни зони [73].



Фиг. 1.7.

1.3. Конструкции и видове инжекционни горелки.

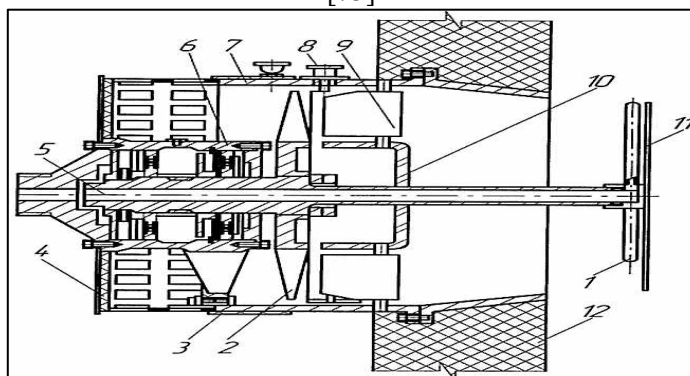
Завъртените турбулентни струи намират широко приложение в съвременните топлоагрегати, горивни камери и апарати в химическата, стъкларската, металургичната, хранително-вкусовата и други отрасли на промишлеността. В последните години са разработени различни конструкции на вихрови горелки [4], [5], [41], като част от тях са разгледани в настоящата глава от дисертационния труд.

Факел равномерно разпределен по периметъра и прилепващ към излъчващата повърхност се създава по два начина [41]:

- Чрез въвеждане в течението на отражател (разсекател), (фиг. 1.21);
- Чрез завъртане на течението (фиг. 1.19).



Фиг. 1.19. Изглед на модулна вихрова горелка и изображение на стабилен пламък на Коанда [74], [73].



Фиг. 1.21. Плоскопламъчна турбулентна горелка с дисков отсекател [49].

Наблюдаваното проявление на непрекъснато обтичане на тяло и прилепване на струята към повърхност му, в литературата [74], [73], [41] се нарича ефект на Коанда. Именно този ефект се използва за създаване на завъртяна струя по аеродинамичен способ.

ГЛАВА 2. ПРЕДИШНИ РАЗРАБОТКИ НА КОЛЕКТИВА. ВЛИЯНИЕ НА КОНСТРУКТИВНИТЕ И РЕЖИМНИ ПАРАМЕТРИ ВЪРХУ ЕФЕКТИВНОСТТА НА ГОРЕНЕ НА ИНЖЕКЦИОННА ВИХРОВА ГОРЕЛКА

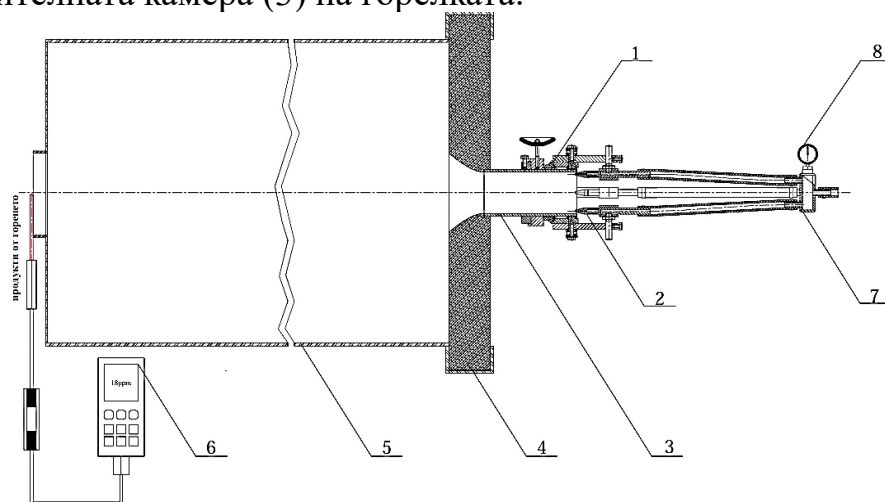
2.1. Формулиране на проблема.

Намаляване на емисиите и повишаване ефективността на горивните устройства продължава да мотивира научната и изследователска общност, и да стимулира технологичното развитие на горивните системи, за въздействие върху горивния процес, с цел оптималното му управление. В настоящата глава са разгледани и анализирани резултати от експериментални изследвания относно влиянието на основни режимни и конструктивни параметри върху ефективността на горене на инжектирана завъртяна струя, което е предпоставка за ефективно въздействие върху горивния процес и неговото интензифициране.

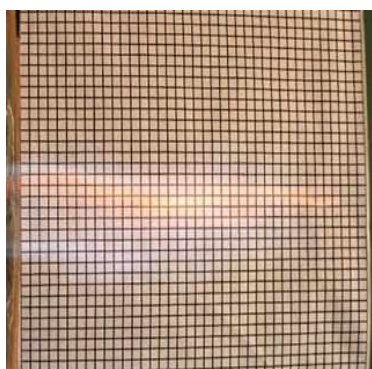
2.2. Същност и методология на експеримента.

От направени проучвания върху проведени предходни експерименти и данни от литературни източници [37], [34], [116], [7], [6], [5], [41] се установяват четири основни конструктивни и режимни параметъра, оказващи най - съществено влияние върху ефективността на горелки с инжектирана завъртяна струя: ъгъл на наклон на газовите дюзи - β° ; диаметъра на отворите на дюзите, през които изтича газовото гориво - d , mm ; топлинно натоварване на горелката - Q , kW ; дължина на смесителната камера - l , mm .

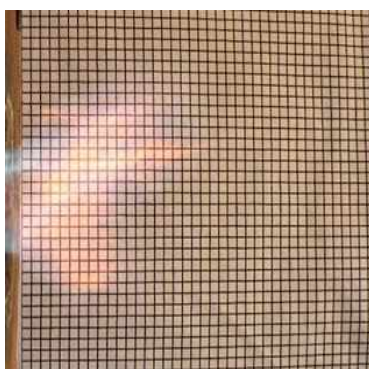
За провеждане на натурните експерименти е използвана лабораторна установка на плоскопламъчна инжекционна горелка (фиг. 2.1) намираща се в лабораторията по „Горивна техника и технологии“ на ИПФ - Сливен, чиято конструкция включва конусен зъбен завъртащ апарат (1) с монтирани към него четири сменяеми газови дюзи (2), тангенциално насочени спрямо централната ос на смесителната камера (3) на горелката.



Фиг. 2.1. Схема на лабораторна установка на плоскопламъчна инжекционна горелка.
1 - конусен зъбен завъртащ апарат; 2 - газови дюзи; 3 - смесителна камера; 4 - огнеупорна плоча с тороидален отвор; 5 - горивна камера; 6 - газоанализатор; 7 - разпределителен газов колектор; 8 - манометър.



Фиг. 2.3. $\beta=0$



Фиг. 2.4. $\beta=30^\circ$

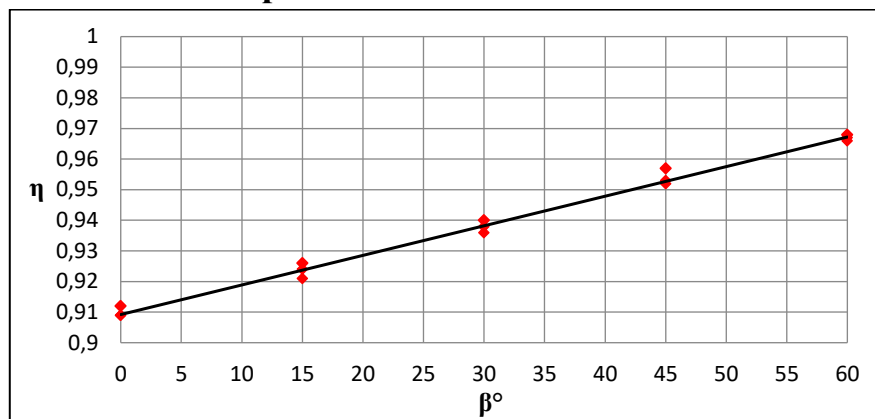


Фиг. 2.5. $\beta=60^\circ$

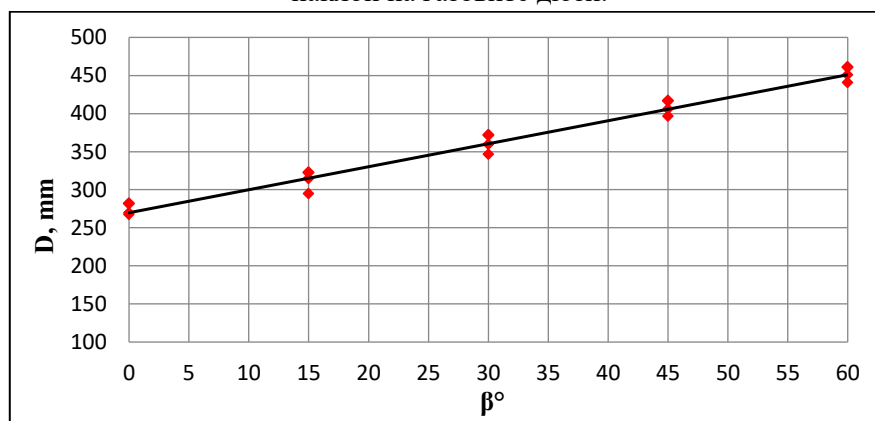
На фигури 2.3, 2.4 и 2.5 са показани изображения на факела при различен ъгъл на газовите дюзи, като се наблюдава, че с увеличаване на ъгъла на газовите струи факела постепенно от правоточен преминава в умерено завъртян и при ъгъл 60° преминава в силно завъртян. При силно завъртян факел се наблюдава непрекъснато обтичане и прилепване на струята към външната

повърхност на горивното устройство, това проявление в литературата [8], [46], [41] както бе описано се нарича ефект на Коанда.

2.3. Анализ на експерименталните изследвания.



Фиг. 2.8. Изменението на коефициента на полезно действие в зависимост от промяната на ъгъла на наклон на газовете дюзи.



Фиг. 2.9. Изменението на диаметъра на газовия факел в зависимост от промяната на ъгъла на наклон на газовете дюзи.

На фигури 2.8 и 2.9 са показани измененията на коефициента на полезно действие (η) и диаметъра на газовия факел (D) в зависимост от промяната на ъгъла на наклон на газовете дюзи (β) т.е. $\eta = f(\beta)$ и $D = f(\beta)$. Зависимостта е получена при диаметър на газовете дюзи $d=0,8\text{mm}$, дължина на смесителната камера $l=225\text{mm}$ и топлинно натоварване на горелката $Q=90\text{kW}$, което отговаря на дебит на газа $3,2\text{m}^3/\text{h}$. Като от получените и изведени зависимости, се наблюдава, че влиянието на ъгъла на дюзите като конструктивен параметър влияе значително върху ефективността на горелката. Като се наблюдава, че с увеличаване на ъгъла на завъртане на дюзите осезателно се покачва стойността на коефициента на полезно действие и големината на факела.

ГЛАВА 3. ОСНОВНИ УРАВНЕНИЯ И МОДЕЛИ НА ТУРБУЛЕНТНОСТ

3.1. Основни уравнения.

Изчислителната динамика на флуидите се занимава с численото решение на диференциални уравнения, описващи течението на флуида, преноса на топлина и свързаните с тях явления като химични реакции чрез компютърно базирана симулация [78], [164]. За флуидна и нефлуидна среда се решава система от уравнения, описани в литературата [4], [5]:

➤ Уравнението за непрекъснатост:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

➤ Уравнение за запазване на енергията:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T_0) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x C_p T_0) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v_y C_p T_0) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z C_p T_0) = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_e \frac{\partial T_0}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_e \frac{\partial T_0}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_e \frac{\partial T_0}{\partial z} \right) + W + E^k + Q + \Phi + \frac{\partial P}{\partial t} \end{aligned} \quad (3.2)$$

където: c_p - специфичен топлинен капацитет; T_0 - термодинамичната температура при нулева скорост на флуида; K - топлопроводност; W - източников член, отчитащ вискозната работа; Q - обмен източник на топлина; Φ - вискозен източников член, отчитащ генерацията на топлина; E_k - кинетична енергия.

➤ Уравненията на динамиката на флуидите в напрежения имат следния вид:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \quad (3.3)$$

$$+ \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \mu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \mu_t \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \quad (3.4)$$

$$+ \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \mu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \mu_t \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \quad (3.5)$$

$$+ \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \mu_t \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \mu_t \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \pm (\rho - \rho_{ok}) g$$

➤ Уравненията за турбулентното движение в цилиндрична координатна система (x, r, θ) е следният:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{w}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + w \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} \right) - \quad (3.6)$$

$$- \nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{w}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{w^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\nabla^2 v - \frac{v}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right) - \quad (3.7)$$

$$- \nu_t \left(\nabla^2 v - \frac{v}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{w}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} - \frac{vw}{r} = \frac{1}{\rho} \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \nu \left(\nabla^2 w - \frac{w}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right) - \quad (3.8)$$

$$- \nu_t \left(\nabla^2 w - \frac{w}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right),$$

където: Лапласовият оператор ∇^2 е равен на:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \quad (3.9)$$

Преносът на количество на движение, топлина и примеси се представя във вид на сума от ламинарния (молекулярния) и турбулентния (моларния) пренос:

$$\tau_{\Pi} = \mu \cdot \frac{du}{dy} + \tau_T = (\mu + A_T) \cdot \frac{du}{dy} = (\mu + \rho \cdot \nu_T) \cdot \frac{du}{dy} \quad (3.10)$$

$$q_{\Pi} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dy} + q_T = -(\lambda + c_p A_q) \cdot \frac{dT}{dy} = -(\lambda + \rho \cdot c_p \cdot \varepsilon_T) \cdot \frac{dT}{dy} \quad (3.11)$$

$$m_{\Pi} = -D \cdot \frac{dc}{dy} + m_T = -(D + A_m) \cdot \frac{dc}{dy} = -(D + \rho \cdot \varepsilon_m) \cdot \frac{dc}{dy} \quad (3.12)$$

където: Π - означава се пълното или общото тангенциално напрежение или пренос на скаларна субстанция - температура или примеси; μ - динамичен вискозитет; λ - коефициент на топлопроводност; D - коефициентът на молекулярна дифузия; A_T - коефициентът на турбулентен вискозитет; A_q - на коефициент на турбулентна топлопроводност; A_m - коефициент на и турбулентна дифузия.

Последните три коефициента могат да се изразят и чрез пътя на размесване:

$$A_T = \rho \cdot l_T^2 \cdot \frac{du}{dy} \quad (3.13)$$

$$A_q = \rho \cdot l_q^2 \cdot \frac{du}{dy} \quad (3.14)$$

$$A_m = \rho \cdot l_m^2 \cdot \frac{du}{dy} \quad (3.15)$$

където: l_T, l_q, l_m - представляват път на размесване за пренос на количество на движение, топлина и примеси.

Представените диференциални уравнения са в основата, както и най-често използвани в съвременните програмни продукти за решаване на инженерни задачи свързани с турбулентните течения.

3.2. Турбулентни завъртени струи.

Завъртените турбулентни струи намират широко приложение в промишлеността (топлоагрегати, горивни камери и др.), като завъртането на течението се използва като най-добрия метод за активизация на процеси свързани с топло-и масообмен [4], [5]. Завъртените турбулентни струи се характеризират с три компоненти на вектора на скоростта, който е разположен пространствено. В цилиндрични координати завъртяно турбулентно течение е осесиметрично около ос x .

Завъртяното течение се характеризира с число на подобие S - степен на въртене. Съгласно Л. Г. Лойцянский това число на подобие се представя чрез отношение на момента на количество на движение към произведението на количеството на движение (M/I) и характерен за течението линеен размер (r), [4], [5], [6], [41]:

$$S = \frac{M}{I \cdot r} \quad (3.22)$$

$$M = 2\pi\rho\int_0^r r^2 \cdot u \cdot w \cdot dr \quad (3.23)$$

$$I = 2\pi\int_0^r r(\rho \cdot u^2 + p_{ст})dr \quad (3.24)$$

където: M - момент на количество на движение на завъртяна струя, $\text{kg.m}^2/\text{s}$; I - количество на движение на завъртяна струя, kg.m/s ; r - характерен за линеен размер, m ; ρ - плътност на въздуха, kg/m^3 ; u - аксиална компонента на вектора на скоростта, m/s ; w - тангенциална компонента на вектора на скоростта, m/s ; $p_{ст}$ - статично налягане в измерваната точка, Pa ; dr - текущо разстояние от оста на струята до измерваната точка, m .

Като степен на въртене може да се използва и отношението:

$$S = \frac{w_{max}}{u_{max}} \quad (3.25)$$

3.3. Модели на турбулентност използвани при решаване на задачи.

- **K - ε модел на турбулентност.** При моделите от този тип се използват две преносни уравнения - за турбулентната пулсационна енергия k и за дисипацията ε :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left[U'_i \left(\frac{U'_j U'_j}{2} + \frac{p'}{\rho} \right) - \nu \frac{\partial k}{\partial x_i} \right]}_D - \underbrace{U'_i U'_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j}}_P - \underbrace{\beta g_i U'_i C'}_G - \underbrace{\nu \frac{\partial U'_i}{\partial x_j} \frac{\partial U'_i}{\partial x_j}}_E \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\nu U'_k \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right)^2 + 2 \frac{\nu}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x_l} \frac{\partial u'_k}{\partial x_l} \right]}_D - \underbrace{2\nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_l} \frac{\partial u'_k}{\partial x_l}}_{\Omega} - \underbrace{2\nu^2 \left(\frac{\partial^2 u'_i}{\partial x_k \partial x_l} \right)^2}_E \quad (3.28)$$

където: D - дифузионния пренос; Ω - генерация; E - вискозна дисипация; P - генерация на енергия; G - генерация от действие на обемни сили.

- **K - ω модел на турбулентност.** Уравненията за турбулентната кинетична енергия k и дисипативното число ω имат вида [4]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial \Gamma_k}{\partial x_i} \left(\frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (3.38)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial \Gamma_\omega}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (3.39)$$

където: G_k дава генерацията на енергия, която се дължи на взаимодействието на рейнолдсовите напрежения и гредиента на усреднените скорости; Y_k , Y_ω - турбулентната дисипация за k и ω ; S_k , S_ω - вискозна дисипация.

Като заключение, описаните диференциални уравнения и модели на турбулентност са в основата на последващите числени изследвания, определящи адекватността на моделните симулации.

ГЛАВА 4. РЕГРЕСИОНЕН АНАЛИЗ НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ДАННИ ПРИ ИЗСЛЕДВАНЕ РАБОТАТА НА ГОРЕЛКА С ИНЖЕКТИРАНА ЗАВЪРТЯНА СТРУЯ

4.1. Въведение.

В настоящата глава от дисертационния труд се разглеждат методите на планиране, опознаване на многофакторни експерименти, включително подготовка, провеждане и обработка на резултатите от експеримента. За овладяване на методологията на експерименталното изследване е необходимо

пълно разбиране на методите на математическата статистика и регресионен анализ. Също така е необходимо да се развие способност за анализ на обекта на изследване, правилно избиране на параметъра за оптимизация и съществени фактори на обекта на изследване, изграждане на матрица за планиране на експеримента за получаване адекватен математически модел на обекта. Цел в настоящата глава от дисертационния труд е въз основа на регресионен анализ на експериментални данни, при изследване работата на горелка с инжектирана завъртяна струя, да се предложи подход за изучаване влиянието на режимните и конструктивни параметри върху коефициента на полезно действие на горивното устройство, както и основни размери на газовия факел.

4.2. Избор на план на експеримента.

Методът на пълния факторен експеримент позволява да се получи математическо описание на изследвания процес в определена локална област на факторното пространство. Пълен факторен експеримент е експеримент при който се реализират всички възможни не повтарящи се комбинации на нивата на независимите фактори.

Приложен е пълен факторен експеримент 2^k , на две нива с четири фактора ($k=4$). Проведени са 16 опита, като всеки от тях е равномерно дублиране по 3 пъти. Този брой опити дава възможност да се оцени наборът от основни ефекти заедно с техния ефект на взаимодействие [129].

Моделът на експериментите, избрани за това проучване, е 2^4 факторен експеримент за четири независими променливи: ъгъл на наклон на газовите дюзи (X_1); диаметър на газовите дюзи (X_2); топлинно натоварване на горелката (X_3) и дължина на горивната камера (X_4). В таблица 4.1 са дадени интервалите на изменение на факторите (независимите променливи) и техните стойности в натурален мащаб на основното, горното и долното ниво.

Табл. 4.1. Интервали на изменение на факторите				
Фактори	Основно ниво (X_{i0})	Интервал на изменение (ΔX_i)	Горно ниво ($x_i = +1$)	Долно ниво ($x_i = -1$)
$X_1 (\beta^\circ)$	45	15	60	30
$X_2 (d, mm)$	0,8	0,2	1	0,6
$X_3 (Q, kW)$	90	25	115	65
$X_4 (l, mm)$	225	75	300	150

Кодираните стойности на факторите (x_i) се свързват с натуралните (X_i) по зависимостта:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i} \quad (4.1)$$

След прилагане на тази зависимост се получава:

$$x_1 = \frac{\beta - 45}{15} \quad (4.2)$$

$$x_2 = \frac{d - 0,8}{0,2} \quad (4.3)$$

$$x_3 = \frac{Q-90}{25} \quad (4.4)$$

$$x_4 = \frac{l-225}{75} \quad (4.5)$$

4.3. Провеждане на експеримента и статистическа обработка на резултатите.

Проведеният регресионен анализ е извършен в съответствие с разгледани и изучени методики описани в различни литературни източници [138], [80], [37], [127] като последователността на обработка на експеримента в конкретния случай на равномерно дублиране на опитите е както следва:

- За определяне коефициентите на регресия в конкретния случай се построява модел от типа:

$$\bar{y} = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq 4} b_i x_i + \sum_{1 \leq i \leq j \leq 4} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq j \leq l \leq 4} b_{ijl} x_i x_j x_l + b_{ijklm} x_i x_j x_l x_m \quad (4.6)$$

- Изчислява се дисперсията на опита и се извършва проверка на еднородността на редицата дисперсии като се пресмята стойността на критерия на Кохрен или G-критерий:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^N S_{y_u}^2}{N} \quad (4.12)$$

$$S_{y_u}^2 = \frac{\sum_{g=1}^{n_u} (y_{ug} - \bar{y}_u)^2}{f_u} \quad (4.13)$$

$$G^* = \frac{S_{y_{umax}}^2}{\sum_{u=1}^N S_{y_u}^2} \quad (4.14)$$

където: S_y^2 - дисперсия на опита; $S_{y_u}^2$ - дисперсия за всеки опит по ред; $S_{y_{umax}}^2$ - най - голяма дисперсия в редицата; y_{ug} - резултат от g-тото повторение на u-тия опит; $\bar{y}_u$ - средна аритметична стойност на всички n_u повторения на u-тия опит; N - брой на опитите; f_u - броят на степените на свобода при определяне на u-тата дисперсия на ред $S_{y_u}^2$; G^* - изчислена стойност на критерия на Кохрен, $G^* < G^{\text{табл.}}$ - еднородност на редицата дисперсии.

- Извършва се проверка на статистическата значимост на коефициентите от регресионното уравнение по критерия на Стьюдент. Дисперсията на оценките на коефициентите се пресмята по формулата:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{n_u \cdot N} \quad (4.15)$$

$$\Delta b_i = t_{\alpha; f_1} \cdot S_{b_i} \quad (4.16)$$

където: S_{b_i} - средно квадратична грешка; $t_{\alpha; f_1}$ - стойност на t-критерия; f_1 - броя на степените на свобода; α - ниво на значимост; Δb_i - доверителен интервал. Коефициентите, чиято абсолютна стойност е равна или по - голяма от доверителния интервал, са статистически значими.

- Следващият етап на обработка на данните от опита е проверка на хипотезата за адекватност на модела, като се използва критерия на Фишер или F-критерия:

$$F_{f_2; f_1}^* = \frac{S_{in}^2}{S_y^2} \quad (4.17)$$

$$S_{in}^2 = \frac{n \cdot \sum_{u=1}^N (y_u - \bar{y}_u)^2}{f_2} \quad (4.18)$$

където: S_{ln}^2 - дисперсия на неадекватност; F^* - изчислена стойност на критерий на Фишер. Хипотезата за адекватност се приема, когато пресметнатата стойност на F-критерия е $F^* \leq F^{\text{табл.}}$.

След реализиране на пълния факторен експеримент 2^4 и имайки предвид условието за статистическа значимост на коефициентите се получават следните две регресионни уравнения:

$$\begin{aligned} \bar{y} = & 0,9378 + 0,016x_1 + 0,0088x_2 + 0,0109x_3 - 0,0031x_4 - 0,0031x_1x_2 - \\ & 0,0038x_1x_3 - 0,0021x_2x_4 + 0,004x_3x_4 - 0,0013x_1x_2x_3 + 0,001x_1x_2x_4 - \\ & 0,0031x_1x_3x_4 + 0,0013x_2x_3x_4 \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} \bar{y} = & 367,63 + 45,13x_1 + 27,75x_2 + 28,5x_3 - 8,63x_4 + 7,25x_1x_3 - 7,63x_1x_4 - 7x_2x_4 \\ & + 7,75x_3x_4 + 6,88x_2x_3x_4 \end{aligned} \quad (4.20)$$

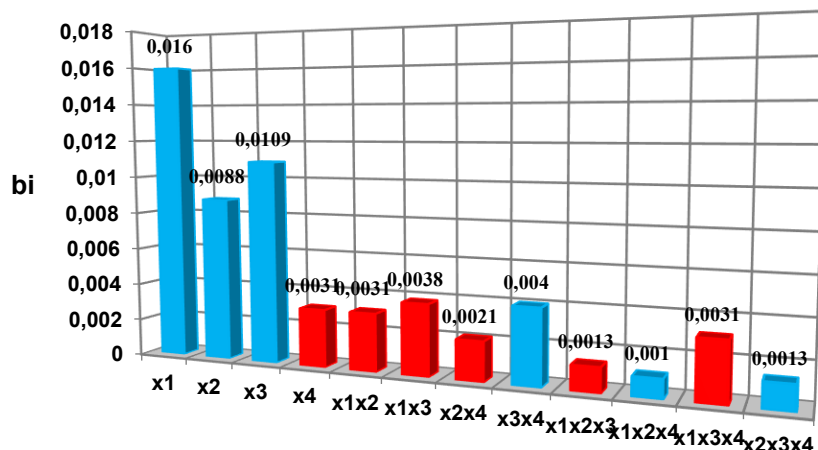
След преминаване от кодиран в натурален мащаб уравненията придобиват вида:

$$\begin{aligned} \eta = & 0,9378 + 0,016 \cdot \frac{\beta-45}{15} + 0,0088 \cdot \frac{d-0,8}{0,2} + 0,0109 \cdot \frac{Q-90}{25} - 0,0031 \cdot \frac{l-225}{75} - 0,0031 \cdot \\ & \frac{\beta-45}{15} \cdot \frac{d-0,8}{0,2} - 0,0038 \cdot \frac{\beta-45}{15} \cdot \frac{Q-90}{25} - 0,0021 \cdot \frac{d-0,8}{0,2} \cdot \frac{l-225}{75} + 0,004 \cdot \frac{Q-90}{25} \cdot \frac{l-225}{75} - \\ & 0,0013 \cdot \frac{\beta-45}{15} \cdot \frac{d-0,8}{0,2} \cdot \frac{Q-90}{25} + 0,001 \cdot \frac{\beta-45}{15} \cdot \frac{d-0,8}{0,2} \cdot \frac{l-225}{75} - 0,0031 \cdot \frac{\beta-45}{15} \cdot \frac{Q-90}{25} \cdot \frac{l-225}{75} \\ & + 0,0013 \cdot \frac{d-0,8}{0,2} \cdot \frac{Q-90}{25} \cdot \frac{l-225}{75} \end{aligned} \quad (4.21)$$

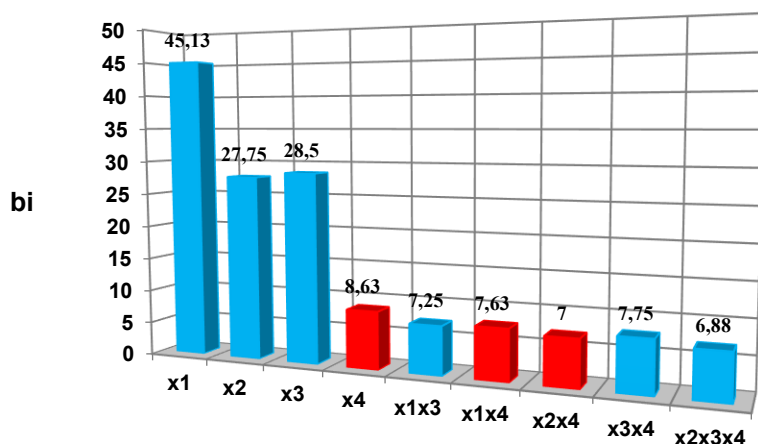
$$\begin{aligned} D = & 367,63 + 45,13 \cdot \frac{\beta-45}{15} + 27,75 \cdot \frac{d-0,8}{0,2} + 28,5 \cdot \frac{Q-90}{25} - 8,63 \cdot \frac{l-225}{75} + 7,25 \cdot \frac{\beta-45}{15} \cdot \frac{Q-90}{25} \\ & - 7,63 \cdot \frac{\beta-45}{15} \cdot \frac{l-225}{75} - 7 \cdot \frac{d-0,8}{0,2} \cdot \frac{l-225}{75} + 7,75 \cdot \frac{Q-90}{25} \cdot \frac{l-225}{75} + 6,88 \cdot \frac{d-0,8}{0,2} \cdot \frac{Q-90}{25} \cdot \\ & \frac{l-225}{75} \end{aligned} \quad (4.22)$$

4.4. Анализ на получените регресионни модели.

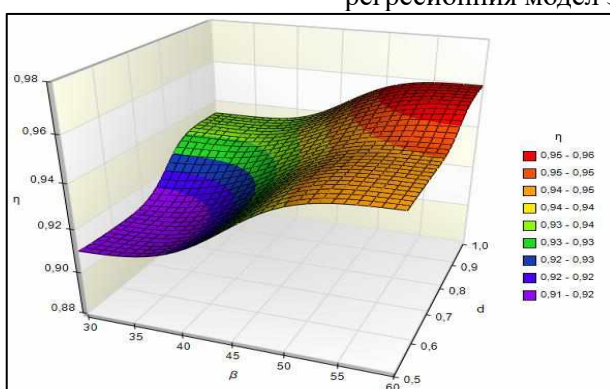
След проведения пълен факторен експеримент, обработените резултати и получените регресионни уравнения на фигури 4.2 и 4.3 са показани диаграми на относителната големина на влияние на факторите и техните взаимодействия, където стойността на всеки коефициент е означена със съответната височина на стълба.



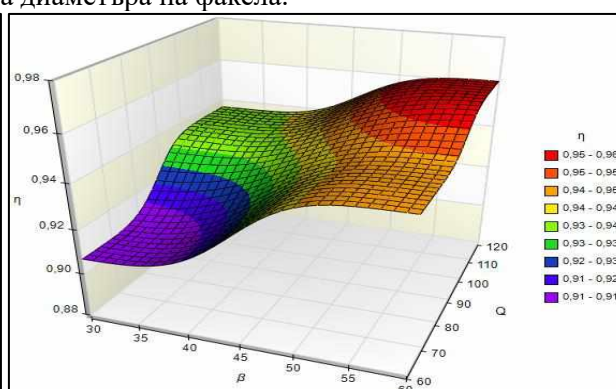
Фиг. 4.2. Относителна големина на влияние на факторите и техните взаимодействия получени при регресионния модел за коефициента на полезно действие на горелката.



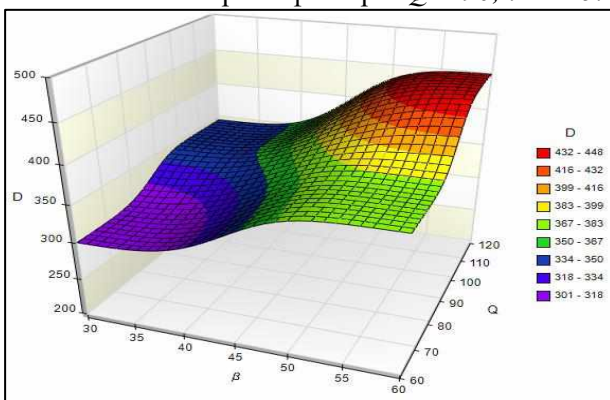
Фиг. 4.3. Относителна големина на влияние на факторите и техните взаимодействия получени при регресионния модел за диаметъра на факела.



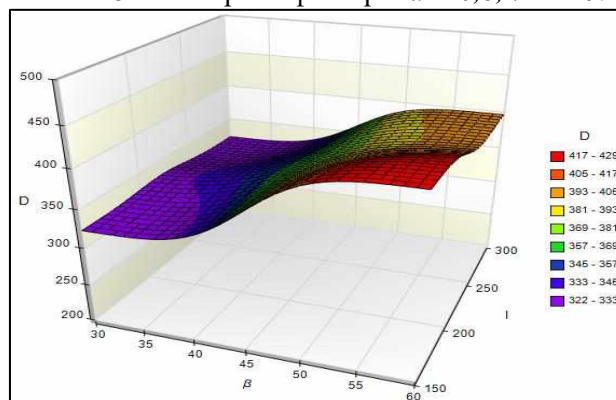
Фиг. 4.4. Фиксирани фактори: $Q = 90$; $l = 225$.



Фиг. 4.5. Фиксирани фактори: $d = 0,8$; $l = 225$.



Фиг. 4.8. Фиксирани фактори: $d = 0,8$; $l = 225$.



Фиг. 4.9. Фиксирани фактори: $d = 0,8$; $Q = 90$.

Графично са изобразени повърхностите на реакциите и техните участъци (за коефициента на полезно действие на горелката и за диаметъра на факела на фигури 4.4, 4.5, 4.8 и 4.9) получени от регресионните уравнения, вследствие влияещите взаимодействия между избраните независими фактори, като се фиксира всеки от факторите на нулево (основно) ниво: $\beta = 45^\circ$; $d = 0,8mm$; $Q = 90kW$; $l = 225mm$.

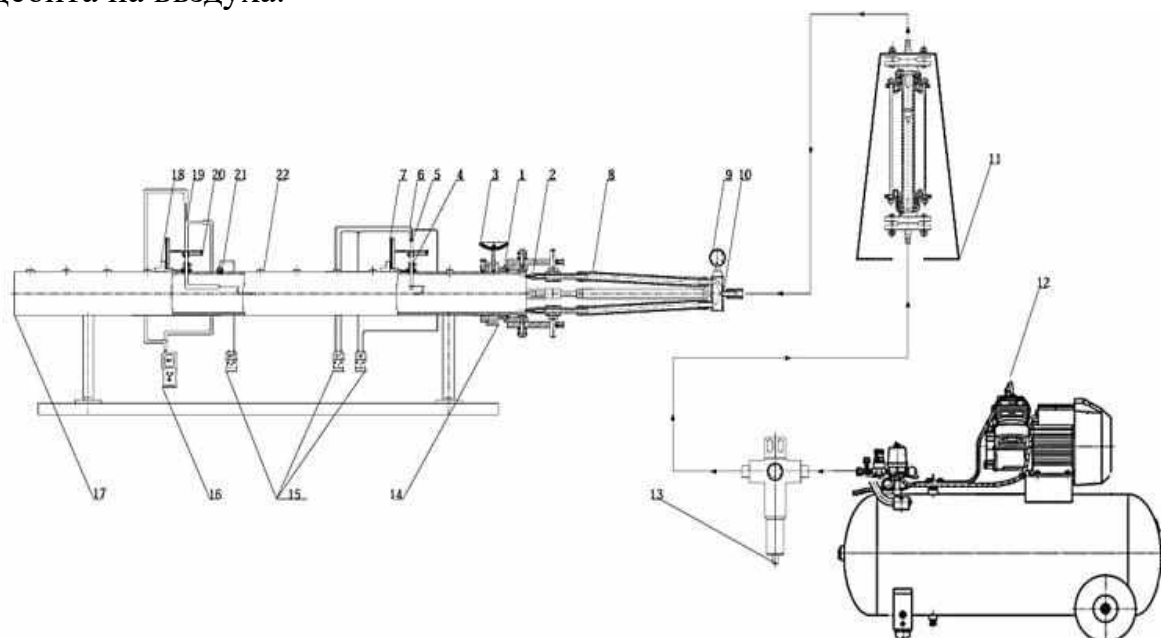
В съответствие с матрицата на планиране и получените регресионни уравнения могат да бъдат избрани подходящи нива на факторите, при които да се получи желаната геометрия на газовия факел и коефициент на полезно действие на горивното устройство. Отчетено е паралелно максимално изменение на стойностите на коефициента на полезно действие и диаметъра на газовия факел.

β°	d, mm	Q, kW	l, mm	$\eta, \%$	D, mm
60	1	115	300	0,962	466
60	1	115	150	0,968	492
60	0,6	115	150	0,959	429
60	1	65	150	0,96	445

Извършеният факторен анализ позволява да се определят, кои фактори са определящи (β - ъгъл на наклон на дюзите, d - диаметър на дюзите, Q - топлинно натоварване, l - дължина на смесителя), за да се заложат при експеримента и какво трябва да се изследва опитно.

ГЛАВА 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ ГАЗОДИНАМИКАТА НА ИНЖЕКТИРАНА ЗАВЪРТЯНА СТРУЯ В ОГРАНИЧЕНО ПРОСТРАНСТВО ПРИ ИЗОТЕРМИЧНИ УСЛОВИЯ

Изследванията са проведени на експериментална инсталация показана на фигури 5.1 и 5.2. Експерименталната инсталация включва смесителна камера, която се състои от безшевна стоманена тръба с хидравлично гладка вътрешна повърхност, с външен диаметър 76mm, дебелина на стената на 3,5mm и дължина 1000mm. На тръбата са разпробити 12 технологични отвора с диаметър 10mm. Към тръбата е закрепен завъртащ апарат с монтирани към него четири сменяеми дюзи. Към четирите дюзи през разпределител колектор от компресор под налягане се подава въздух. Конструкцията на завъртащия апарат позволява да се реализира различен ъгъл β° на наклон на дюзите спрямо оста на смесителната камера в границите от 0° до 60° . Подаваният въздух от компресора преминава през влагоуловител и ротаметър, с който се отчита дебита на въздуха.



Фиг. 5.1. Схема на лабораторна инсталация.

- 1 - завъртащ апарат; 2 - дюзи; 3 - ръкохватка; 4 - стопорна втулка; 5 - триканална цилиндрична сонда; 6 - шлаухи; 7 - метална линия; 8 - пневматични маркучи; 9 - манометър; 10 - разпределителен колектор; 11 - ротаметър; 12 - компресор; 13 - влагоуловител; 14 - лагерираща втулка; 15 - диференциални манометри „Testo 510“; 16 - диференциален манометър „Testo 512“; 17 - хидравлично гладка безшевна тръба; 18 - метален прав ъгъл; 19 - тръба на Прандтл; 20 - транспортер; 21 - щупер; 22 - тапи.



Фиг. 5.2. Снимки на експериментална инсталация за изследване на аеродинамиката на инжектирана завъртяна струя.

Извършени са серия от измервания за определяне аксиалната скорост w_a на течението посредством тръба на Прандтл, и определяне компонентата на вектора $\vec{w}_a$ в равнината по оста x и тангенциална скорост w_t посредством триканална цилиндрична сонда чрез отчитане ъгъла на атака. Отчетени са стойности на наляганията в седем различни напречни сечения по дължина на смесителната камера съответно на 150mm, 225mm, 300mm, 450mm, 600mm, 750mm и 900mm, както и при четири положения на завъртащия апарат $\beta^\circ = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ и 60° , и три различни размера на газовите дюзи $d = 0,6\text{mm}, 0,8\text{mm}$ и 1mm . Експериментите са проведени при температура на околната среда 25°C и постоянно налягане отчитано от манометъра поставен на колектора 0,2Мра.

5.5. Резултати и анализ на експерименталните изследвания.

От извършените експериментални измервания и от отчетените стойности на аксиалната компонента на скоростта w_a и ъгъла γ° на ориентиране на сондата се изчислява стойността на компонентата на вектора на скорост $\vec{w}_a$ в равнината по оста x и тангенциалната компонента на скоростта w_t . Получените числени стойности от измерванията са представени таблично и графично в Приложения 1 ÷ 15 към дисертационния труд. За обработка на данните и резултатите от експериментални опити са използвани описани методи в литературата [4], [61], [25].

$$\vec{V} = w_a \vec{l}_x + w_r \vec{l}_r + w_t \vec{l}_\theta \quad (5.1)$$

където: $\vec{l}_x, \vec{l}_r$ и $\vec{l}_\theta$ – единични вектори по осите (фиг. 5.13).

Тъй като при течения в ограничено пространство компонентата w_r (радиалната) е пренебрежимо малка то по модул скоростния вектор се определя като:

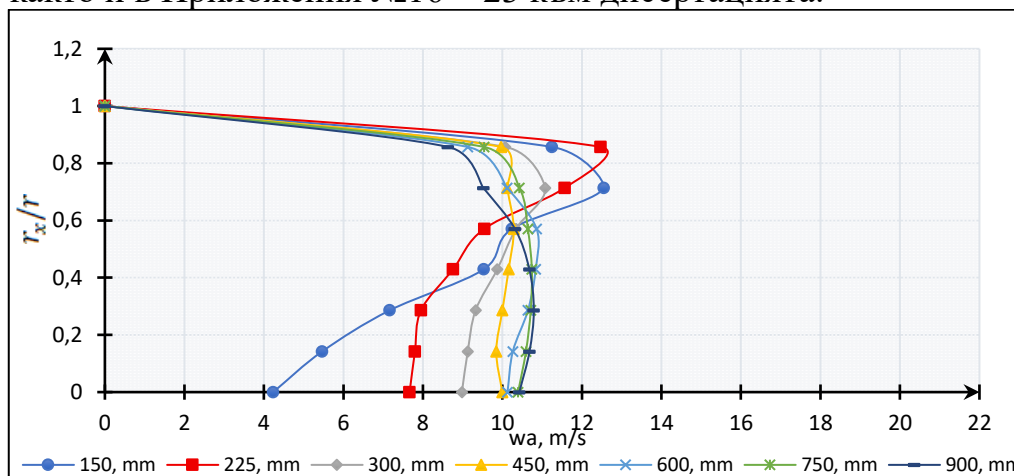
$$|\vec{V}| = \sqrt{w_a^2 + w_t^2} \quad (5.2)$$

$$w_t = \sin \gamma \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} (\Delta p - p_{\text{ст}})} \quad (5.4)$$

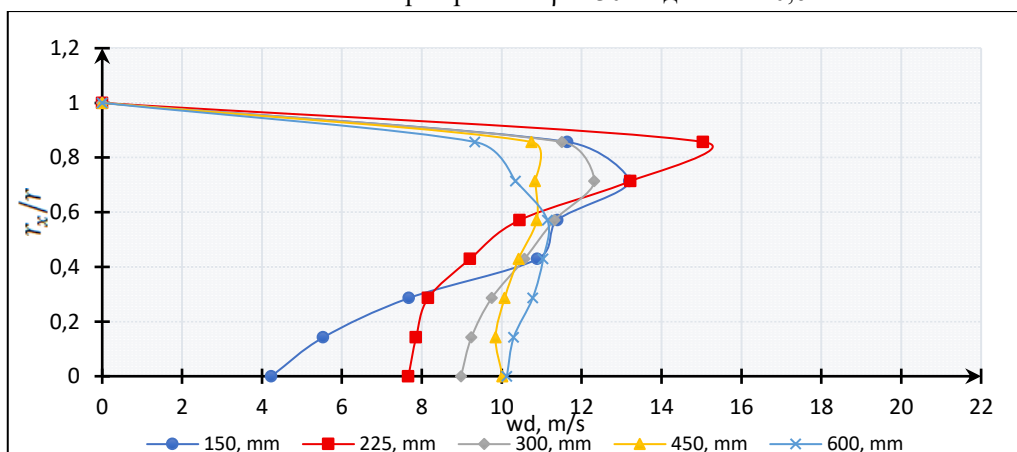
$$w_a = \cos \gamma \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} (\Delta p - p_{\text{ст}})} \quad (5.5)$$

където: Δp – пълно налягане, Па; $p_{\text{ст}}$ – статично налягане, Па; p_d – динамично налягане, Па; w_t и w_a – тангенциална и аксиална компоненти на скоростта, m/s; γ – ъгъл на ориентиране на сондата.

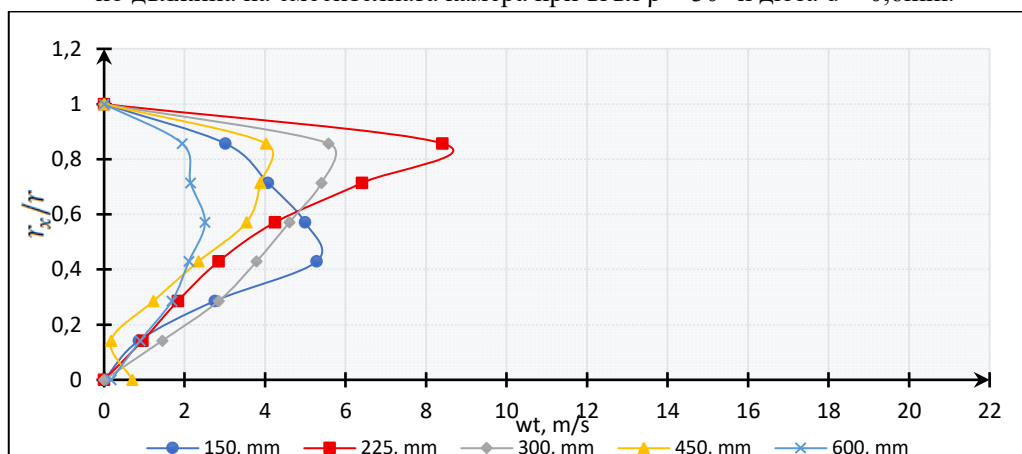
На фигури 5.17÷5.19 графично са показани експериментални резултати получени за аксиалната компонента w_a на скоростта, тангенциалната компонента w_t на скоростта и за компонентата на вектора $\vec{w}_d$ в равнината по оста x , както и в Приложения №16 ÷ 23 към дисертацията.



Фиг. 5.17. Графика на изменение на аксиалната компонента на скоростта w_a , m/s по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 30^\circ$ и дюза $d = 0,6\text{mm}$.



Фиг. 5.18. Графика на изменение на компонентата на вектора на скоростта $\vec{w}_d$, m/s в равнината по оста x по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 30^\circ$ и дюза $d = 0,6\text{mm}$.



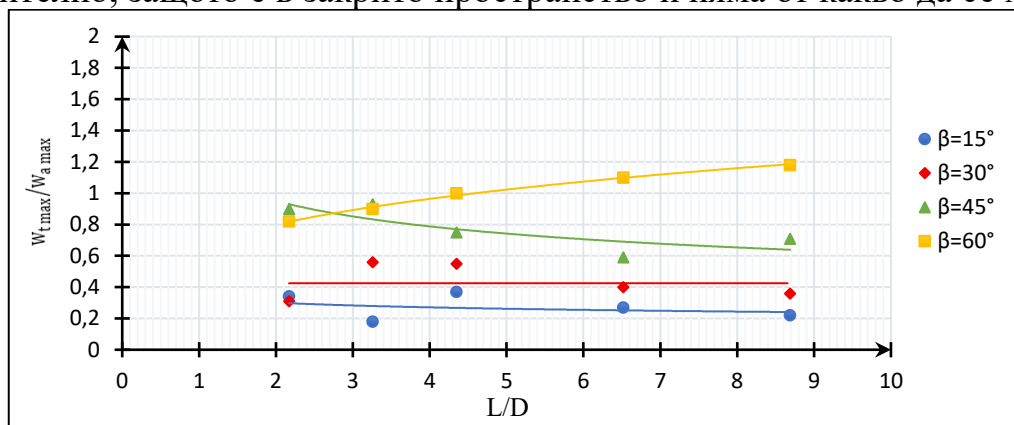
Фиг. 5.19. Графика на изменение на тангенциалната компонента на скоростта w_t , m/s по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 30^\circ$ и дюза $d = 0,6\text{mm}$.

Тук може да се заключи, че в следствие високите стойности на тангенциалната скоростна компонента непосредствено след началното сечение се формира приосева циркуляционна зона.

Една от основните количествени характеристики на завъртяната струя е степента на въртене. Тя е определена по максимални стойности на тангенциалната $w_{t\max}$ и аксиалната $w_{a\max}$ компоненти на скоростта [32]:

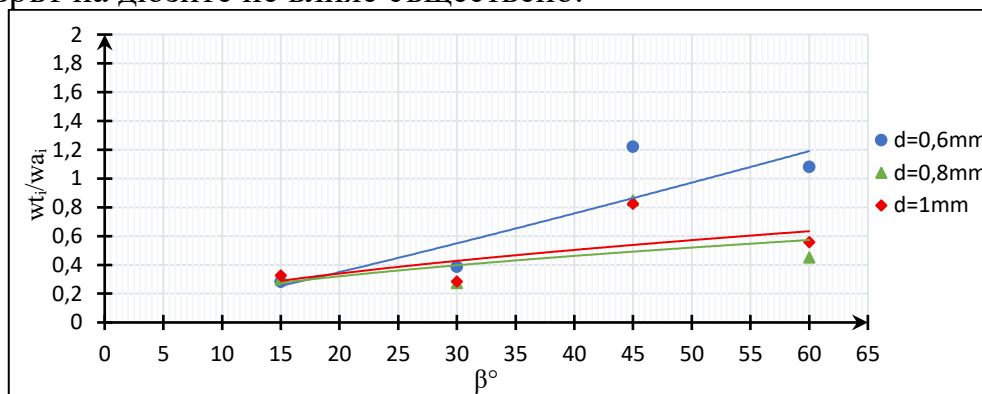
$$S = \frac{w_{t\max}}{w_{a\max}} \quad (5.6)$$

Като се наблюдава (Фиг.5.27), че степента на въртене се променя незначително, защото е в закрито пространство и няма от какво да се мени.

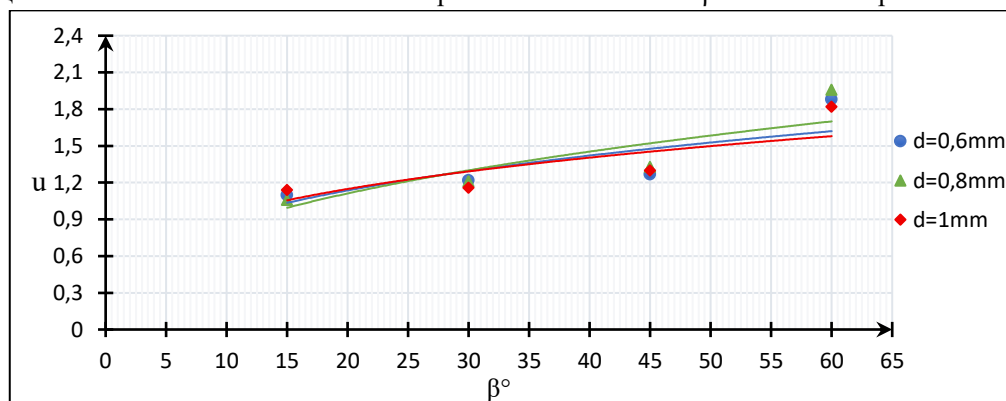


Фиг. 5.27. Изменение на степента на въртене по дължина на смесителната камера при различен ъгъл β и диаметър на дюзите $d=0,8\text{mm}$.

Степента на въртене е определена и като отношение на средноинтегралните стойности на тангенциалната към аксиалната компоненти на скоростта, за различните сечения по дължина на смесителната камера. При получените графики се наблюдава, че извън началния участък (150mm) диаметърът на дюзите не влияе съществено.

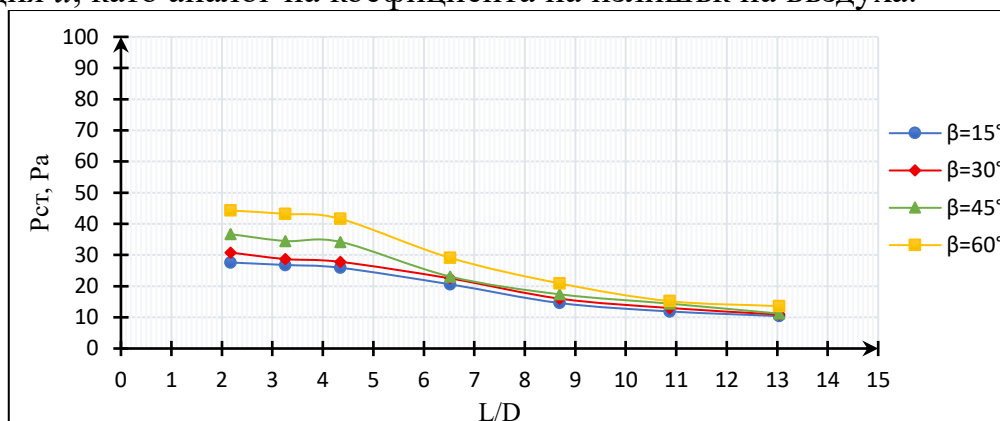


Фиг. 5.29. Изменение на степента на въртене определена по средноинтегралните стойности на тангенциалната и аксиалната компоненти при изменение на ъгъл β в сечение на разстояние 150mm.



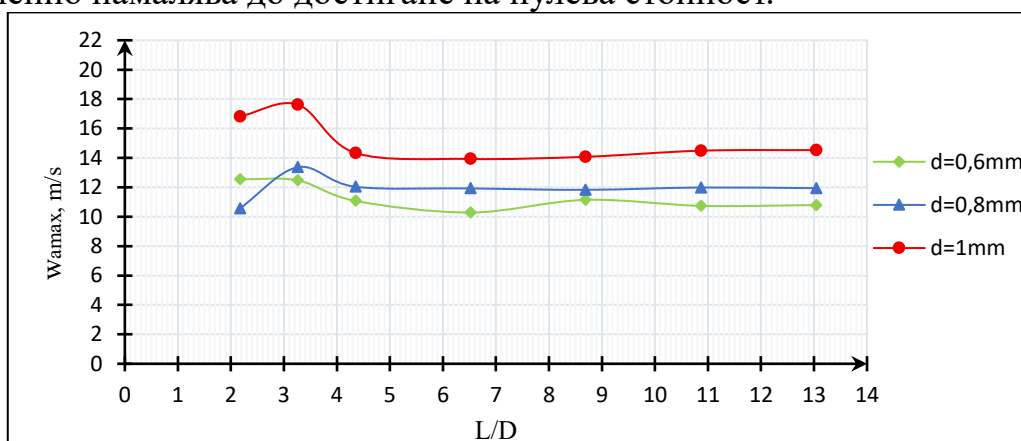
Фиг. 5.36. Изменение на масовият коефициент на инжекция във функция от ъгъл β в сечение на разстояние 225mm.

От показаните графики на фигура 5.36 може да се заключи, че с промяна на ъгъл β се променя количеството на инжектирания от околната среда въздух в горивното пространство, което води до промяна на масовия коефициент на инжекция u , като аналог на коефициента на излишък на въздуха.

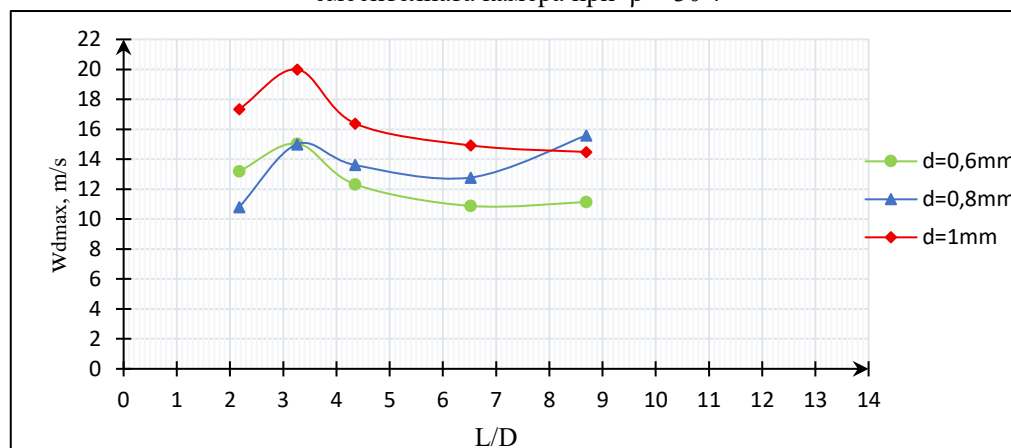


Фиг. 5.40. Изменение на статичното налягане по дължина на смесителната камера при различен ъгъл β и диаметър на дюзите $d=0,6\text{mm}$.

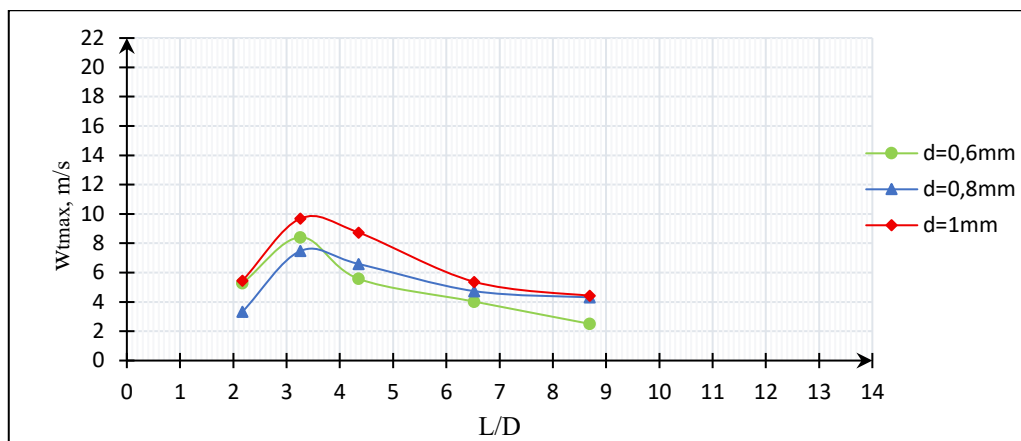
На фиг. 5.40 е показано изменението на статичното налягане по дължина на смесителната камера при различен ъгъл β и диаметър на дюзите. Като се забелязва, че изменение на статичното налягане по дължина на смесителната камера от 150mm до 300mm е постоянно и от сечение 300mm нататък постепенно намалява до достигане на нулева стойност.



Фиг. 5.43. Изменение на максималните стойности на аксиалната компонента по дължина на смесителната камера при $\beta = 30^\circ$.



Фиг. 5.44 Изменение на максималните стойности на компонентата на вектора на скоростта в равнината по оста x по дължина на смесителната камера при $\beta = 30^\circ$.



Фиг. 5.45. Изменение на максималните стойности на тангенциалната компонента по дължина на смесителната камера при $\beta = 30^\circ$.

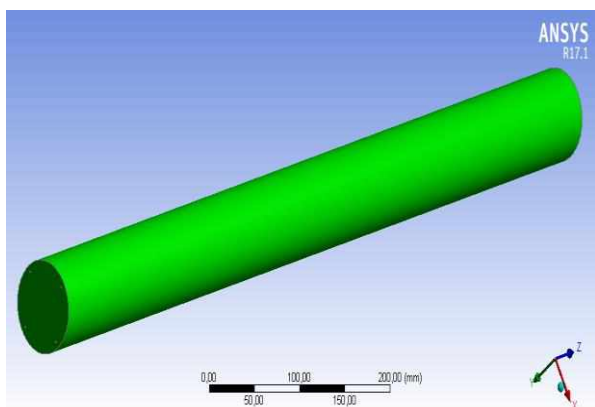
На фиг. 5.43, 5.44 и 5.45 е представено изменението на вектора на скоростта и неговите компоненти при максимална стойност по дължина на смесителната камера при $\beta = 30^\circ$, като от тях се вижда, че максимумите, които се наблюдават са в областта от 150-250мм, което ми дава основание за избор на дължина на смесителния участък.

От анализа на получените опитни резултати може да се направи следния извод, че в следствие високите стойности на тангенциалната скоростна компонента непосредствено след началното сечение се формира приосева циркулационна зона, като функция на голяма стойност на напречния градиент на налягането и центробежния ефект от въртенето. Формира се завъртяна следа, пръстеновидна пристенна струя с максимум близо до стената и най-ниски стойности по оста. Максималната скорост се запазва почти постоянна, оформя се пристенен граничен слой и зона на установено разпределение на скоростта w_a , става един равномерен профил до края на течението в тръбата.

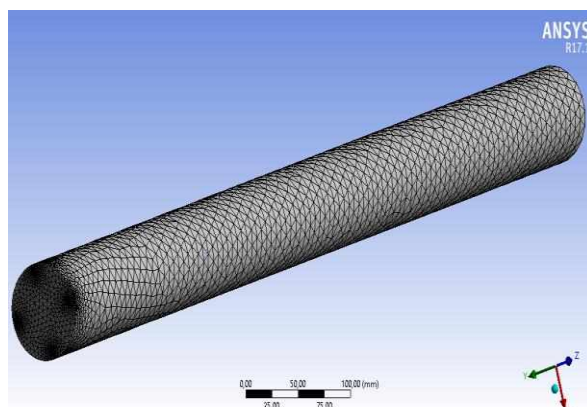
ГЛАВА 6. ЧИСЛЕНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ИНЖЕКТИРАНА ЗАВЪРТЯНА СТРУЯ В ОГРАНИЧЕНО ПРОСТРАНСТВО ПРИ ИЗОТЕРМИЧНИ УСЛОВИЯ

В тази глава е извършена симулация на завъртяна инжектирана струя в ограничено пространство при изотермични условия. За създаването на модела се използват резултатите от получените експериментални изследвания, спазвайки всички условия на геометрично и физично подобие. За целите на симулационното изследване е използвана компютърна програма Ansys CFX. Основните етапи, при разработване на симулационни модели на физико - химични процеси използвайки Ansys CFX, са следните:

- Изграждане на тримерна геометрична структура на смесителната камера (фиг. 6.1).
- Генериране на изчислителна мрежа от клетки, покриващи цялата геометрична област на създадения тримерен модел. Като при настоящото изследване е използван автоматичен метод за омрежване (фиг. 6.2).

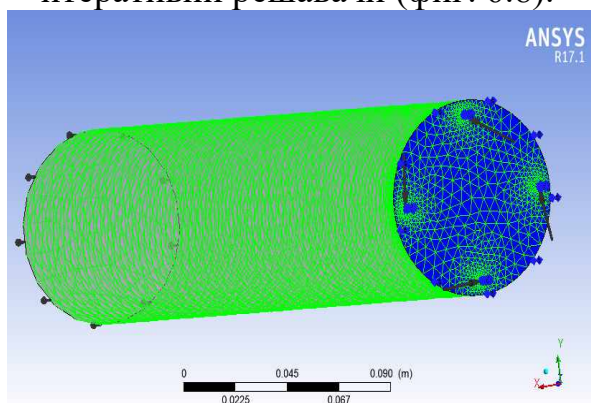


Фиг. 6.1. Схема на геометричния модел.

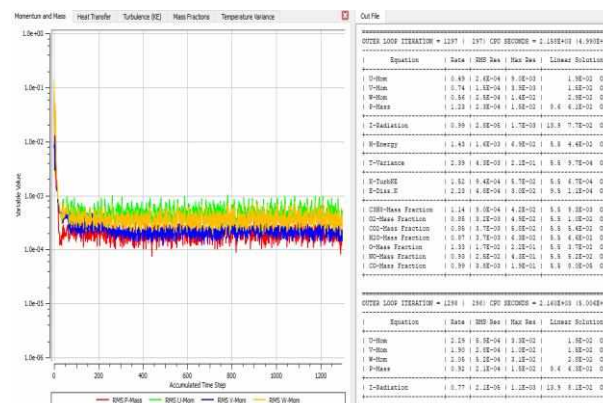


Фиг. 6.2. Схема на дискретизация.

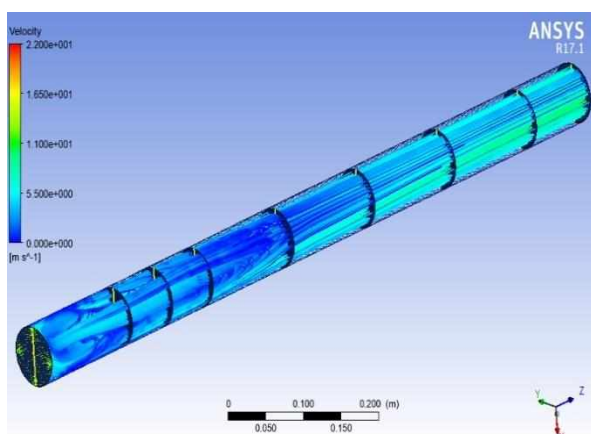
- Дефиниране на модела. В този етап се определят физико - химичните свойства и характеристиките на флуида, извършва се настройка на модела за флуидна среда, както и дефиниране на началните и гранични условия
- Числено решение и проверка на сходимостта. Задаване на подходящи параметри в контрола на решението, обикновено включва спецификация на подходящи схеми за дискретизация (интерполация) и избор на подходящи итеративни решавачи (фиг. 6.8).



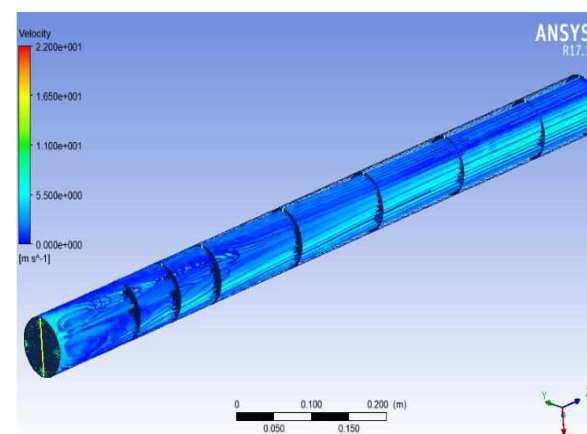
Фиг. 6.6. Схема на флуидни пространства



Фиг. 6.8. Числено решение на модела.



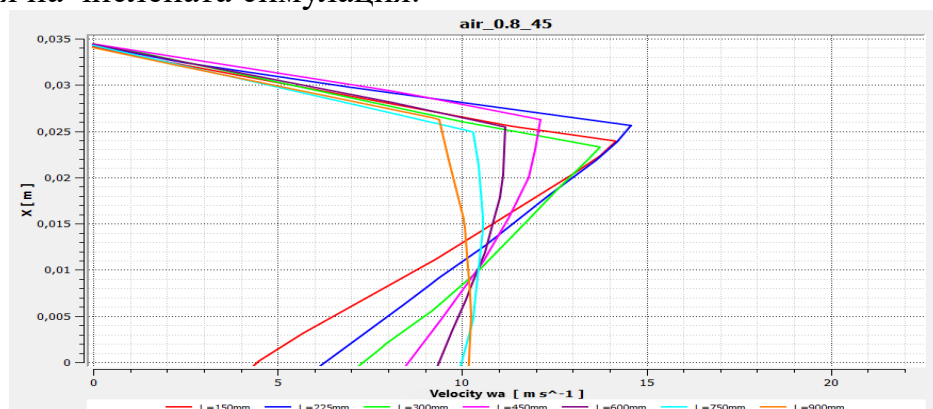
Фиг. 6.10. Разпределение на токовите линии в смесителната камера при $d=0.8\text{mm}$ и $\beta=45^\circ$.



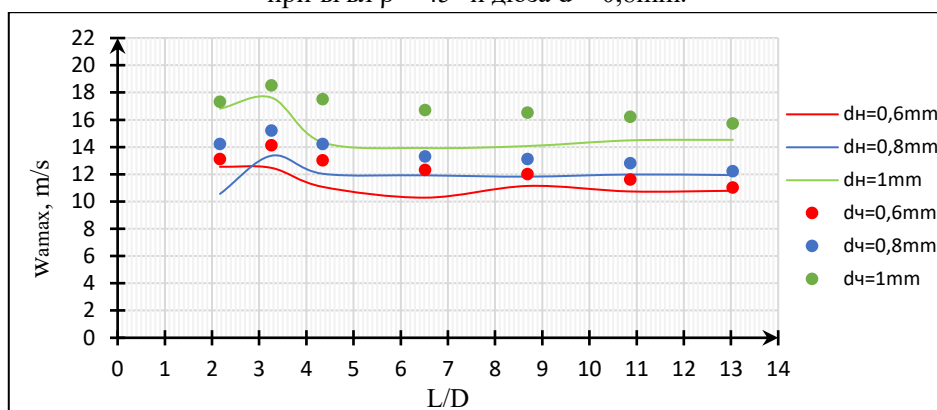
Фиг. 6.11. Разпределение на токовите линии в смесителната камера при $d=0.8\text{mm}$ и $\beta=60^\circ$.

От фигури 6.10 и 6.11 са показани резултати от разпределение на токовите линии в смесителната камера при $d=0.8\text{mm}$, при числена симулация, където се вижда, че при 45° се заражда циркуляционна зона, която ясно се

оформя като затворен контур при 60° в съответния диапазон. В диапазона след сечение 450mm се наблюдава успоредност на токовите линии до изходното сечение. На фигура 6.13 е показано изменението на аксиалната компонента на скоростта по дължина на смесителната камера при ъгъл на наклон 45° и диаметър на дюзите $d=0,8\text{mm}$ като резултати от числения експеримент. На база на тези графики и резултатите от натурните експерименти е направена валидация на числената симулация.



Фиг. 6.13. Графика на изменение на аксиалната скорост w_a , m/s по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 45^\circ$ и дюза $d = 0,8\text{mm}$.



Фиг. 6.15. Съпоставка на скоростни профили при максимални стойности на аксиалната компонента по дължина на смесителя от експерименти и числена симулация при $\beta = 30^\circ$.

Валидирането на резултатите са представени на фиг. 6.15. Като с точки са обозначени резултатите от числения модел, а с плътна линия резултатите от натурния експеримент. От съпоставката на скоростния профил на аксиалната компонента на скоростта по дължина на смесителната камера при числения и натурния експеримент се наблюдава сходство на характера на изменение.

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (6.1)$$

където: RMSD - средноквадратично отклонение; n - брой на изследваните точки; y_i - стойност от численото изследване; $\bar{y}_i$ - стойност от натурния експеримент.

В таблица 6.2 са представени стойности от числения модел и експерименталните измервания, както и изчислени стойности на средноквадратичното отклонение. След определяне средноквадратичното отклонение по формула 6.1 се вижда, че е в границите на допустимост на представителната извадка.

Средноквадратично отклонение при дюза d=0,6mm и ъгъл β = 45° Таблица 6.2								
Числена стойност, m/s	13	13,2	12,3	10,9	9,9	9,4	9,2	1,33
Измерена стойност, m/s	12,5	11,1	10,3	9,4	9,9	10,1	8,2	
Средноквадратично отклонение при дюза d=0,8mm и ъгъл β = 45°								
Числена стойност, m/s	14,1	14,5	13,8	12	11,1	10,5	10,2	1,3
Измерена стойност, m/s	13,3	12,6	11,6	10,7	11	10,9	11,1	
Средноквадратично отклонение при дюза d=1mm и ъгъл β = 45°								
Числена стойност, m/s	17,2	17,8	16,8	15,4	14,1	13,8	13,3	2,14
Измерена стойност, m/s	17,9	14,8	12,7	13,2	13,3	13,4	13,4	

Получените резултати от числената симулация са почти еднакви с тези от експерименталните изследвания, което ми дава основание да считам че моделът е адекватен и мога да го ползвам за последващи изследвания при неизотермични условия.

ГЛАВА 7. ЧИСЛЕНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ГОРИВЕН ПРОЦЕС В ОГРАНИЧЕНО ПРОСТРАНСТВО НА ИНЖЕКТИРАНА ЗАВЪРТЯНА СТРУЯ

В настоящата глава от дисертационния труд чрез използване на компютърна симулация е изследвано влиянието на плътността на топлинния поток върху горивен процес в началния участък на факела, при разделно подаване на горивото и окислителя в условията на инжектирана завъртяна струя. При извършената компютърна симулация са разгледани и анализирани пет случая при промяна на плътността на топлинния поток през цилиндричната повърхност на смесителната камера - адиабатни условия и наличие на топлообмен, като са задавани различни стойности на коефициента на топлопредаване h . Както бе споменато числената симулация е направена за пет случая - при адиабатни условия (без топлообмен) стойност на $h = 0\text{W/m}^2\text{K}$ и с наличие на топлообмен, като за h са взети стойности $h = 30, 100, 500$ и $1000\text{W/m}^2\text{K}$.

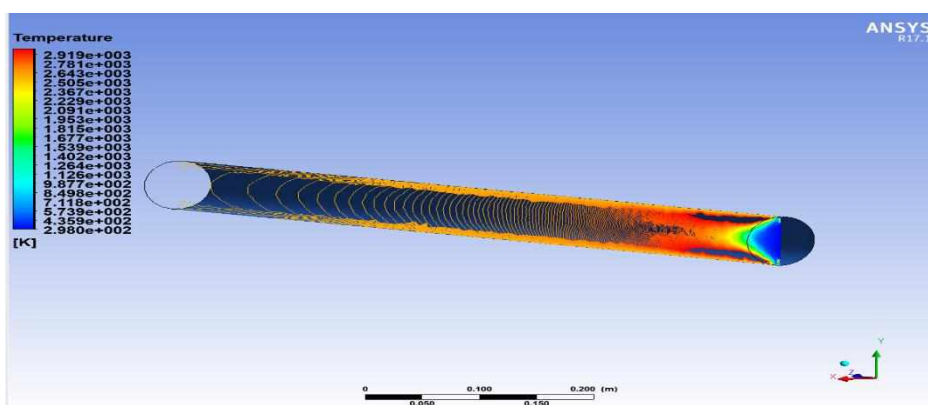
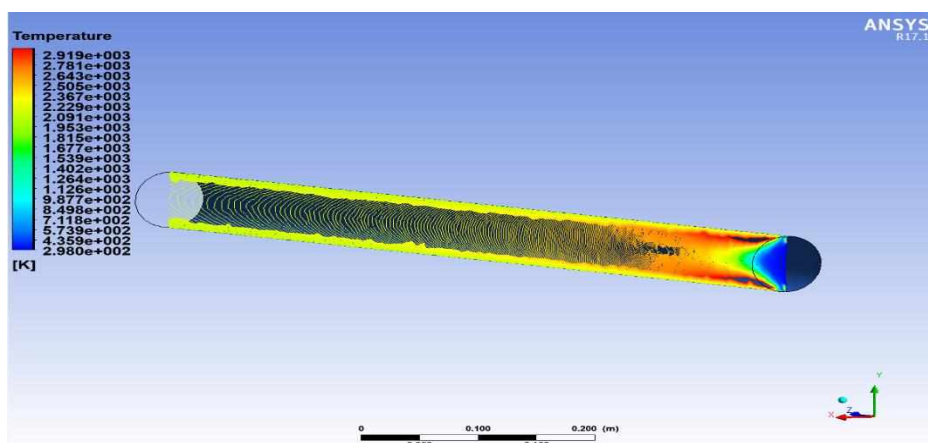
На таблица 7.2 са показани началните и гранични условия за числения модел. В настоящото числено изследване е използвана комбинация от EDM турбулентен горивен модел и P1 радиационен модел. EDM модела проследява всеки отделен химичен елемент със собствено транспортно уравнение. Той е най-добрият приложим модел при турбулентните течения, когато скоростта на химичната реакция е сравнително бърза за преносните процеси в течението.

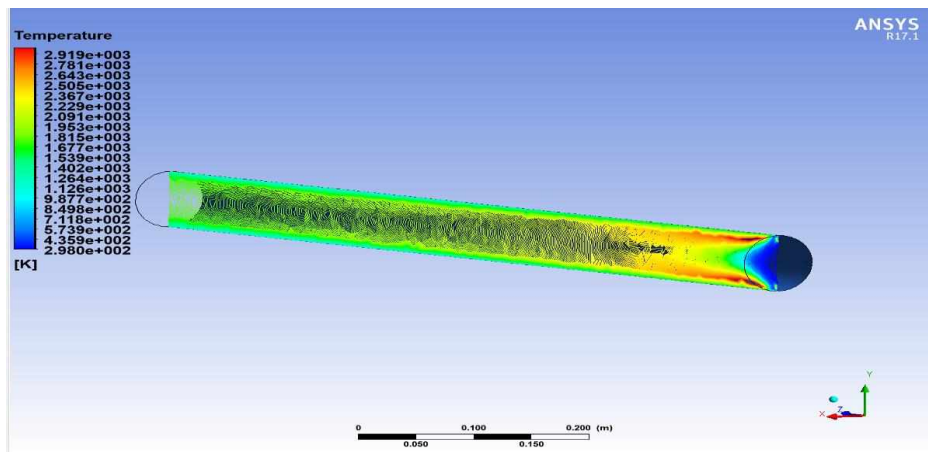
Избран е стандартен k - ϵ модел на турбулентност. Стандартния k - ϵ модел на турбулентност е полуемперичен модел, базиран на транспортните уравнения за турбулентната кинетична енергия (k) и скоростта на дисипация (ϵ). Съгласно този модел се приема, че течението е напълно развито турбулентно.

Таблица 7.2

Component	Feature	Details
CFX-Pre	User Mode	General Mode
	Analysis Type	Steady State
	Fluid Type	Reacting Mixture
	Domain Type	Single Domain
	Turbulence Model	k-Epsilon
	Heat Transfer	Thermal Energy
	Combustion	Eddy Dissipation
	Radiation	P1
	Boundary Conditions	Inlet (C_3H_8): F17.15, F21.15, F22.15, F24.15 Relative pressure 0,2MPa Air inlet (opening): F16.15 Relative pressure 0Pa Outlet (burning products): F14.15 Relative pressure 0Pa Walls (adiabatic and heat transfer coefficient): F18.15, F19.15, F20.15, F23.15, F25.15
	Timestep	Physical Time Scale

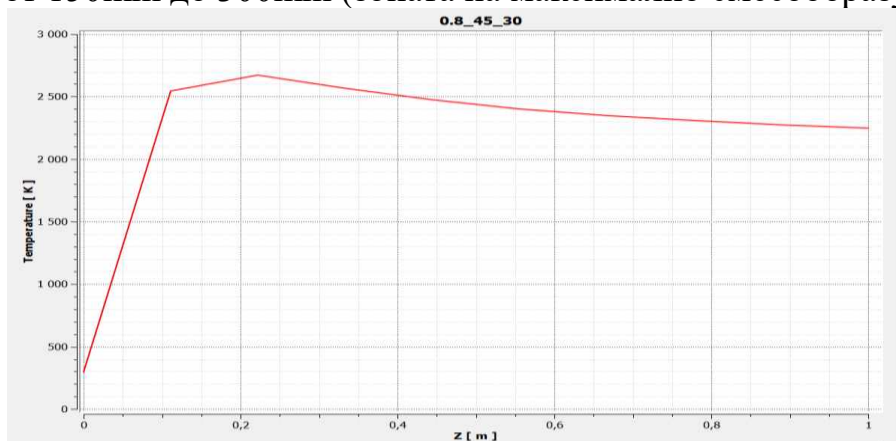
На фигури 7.2÷7.4 са показани температурни разпределения в самия горивен факел по централната надлъжна негова ос при различни коефициенти на топлопредаване h и ъгъл на наклон на газовите дюзи 30° , с диаметър на дюзите $d = 0,8\text{mm}$.

Фиг. 7.2. Разпределение на изотермите при $h=0\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=30^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.Фиг. 7.3. Разпределение на изотермите при $h=30\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=30^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

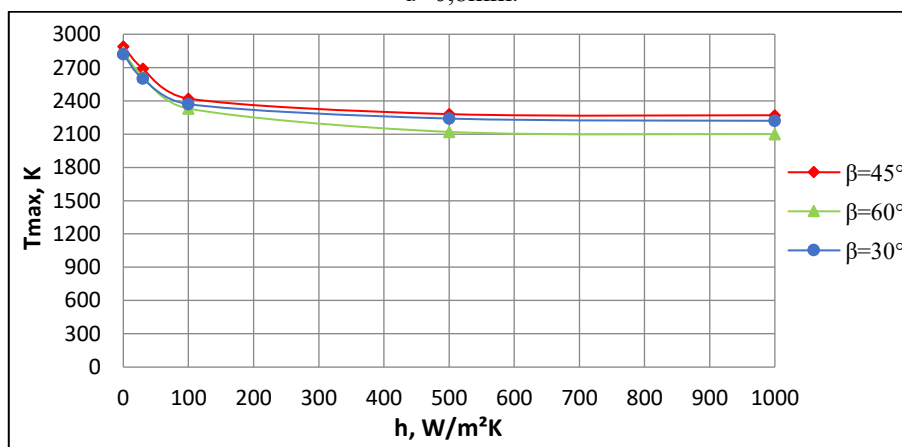


Фиг. 7.4. Разпределение на изотермите при $h=100\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=30^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

От получените разпределения на изотермите се вижда, че плътността на топлинния поток през стените на смесителната камера оказва съществено влияние върху формата и големината на високотемпературното ядро на факела. При всички случаи на промяна на степента на топлоотвеждане през стените на горивната камера високотемпературното ядро във факела се формира в диапазона от 150mm до 300mm (зоната на максимално смесообразуване).



Фиг. 7.18. Изменение на температурата по оста на смесителната камера при $h=30\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=45^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

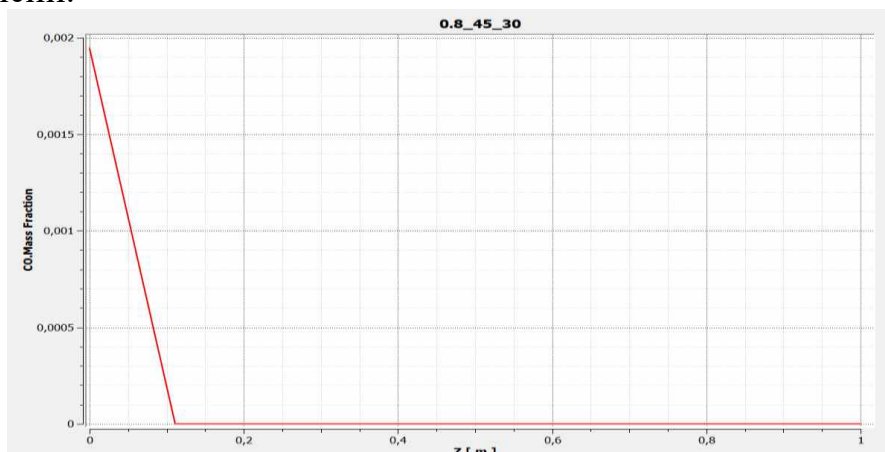


Фиг. 7.20. Изменение на $T_{max} = f(h)$ при различни ъгли на наклон на дюзите и $d=0,8\text{mm}$.

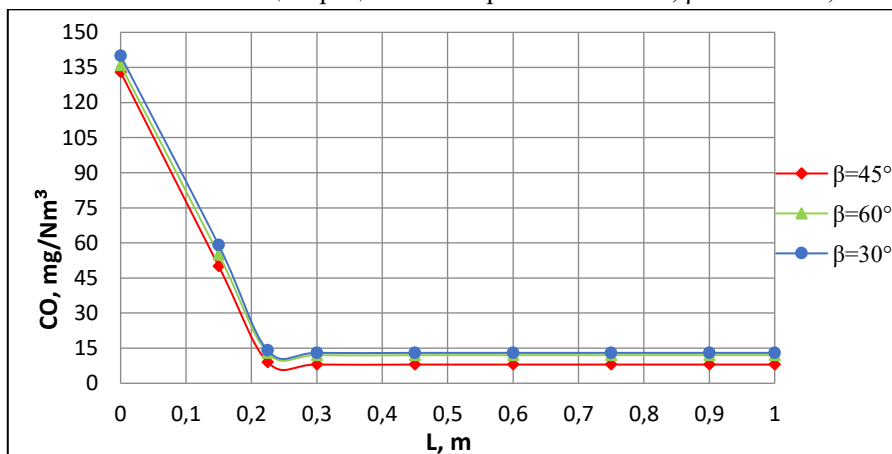
От изменение на температурата по оста на смесителната камера се вижда (фиг.7.18), че при всички стойности на изменение на коефициента на топлопредаване h максимална стойност на температурата се получава при ъгъл на наклон на дюзите β в интервала $45^\circ \div 50^\circ$. С увеличаване на интензивността

на топлообмен температурните нива по оста на факела се понижават, но запазват характера си на изменение.

Направена е съпоставка (7.20) на изменението на $T_{max} = f(h)$ при числена симулация при различни ъгли на наклон на дюзите и диаметър на дюзите $d = 0,8\text{mm}$. Наблюдава се снижение на максималната температура с увеличаване на интензивността на топлообмен с околната среда. Получените графики могат да се ползват за намиране на оптимален вариант между топлообмен през стените на камерата, ъгъл на наклон на дюзите и минимално генерирани вредни емисии.



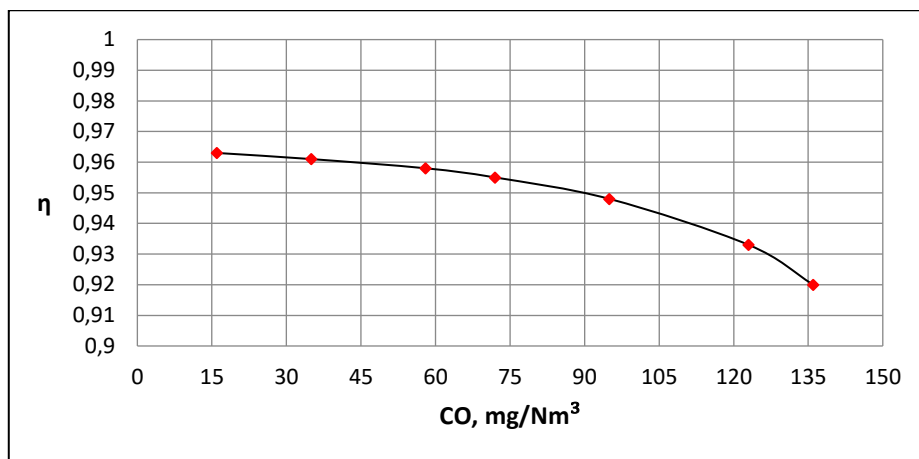
Фиг. 7.21. Масова концентрация на CO при $h=30\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=45^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.



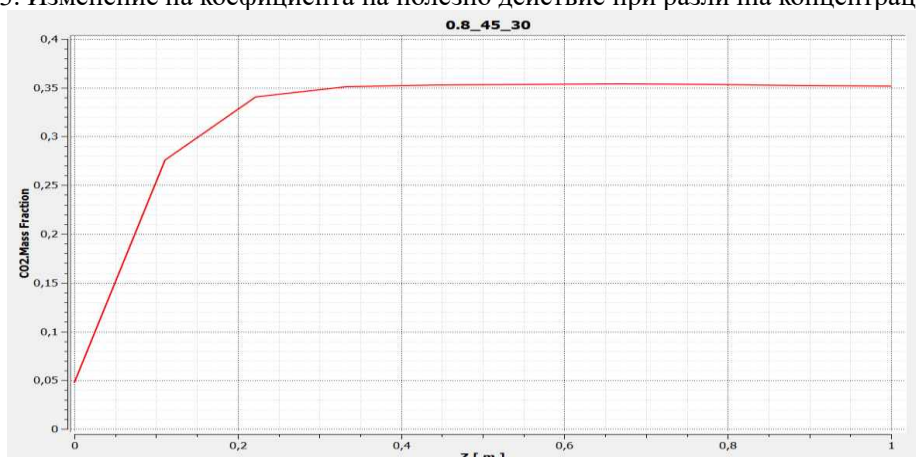
Фиг. 7.22. Концентрация на CO по дължина на смесителната камера при различен ъгъл β , $d=0,8\text{mm}$ и $h=30\text{W/m}^2\text{K}$.

На фигура 7.21 и Приложения № 35÷39 към дисертационния труд резултатите са от числен експеримент, а на фигура 7.22 са от натурни измервания вижда се, че минимално количество CO се образува в зоната със сечение 150mm и 300mm , което потвърждава за пореден път оптималната дължина на смесителния участък.

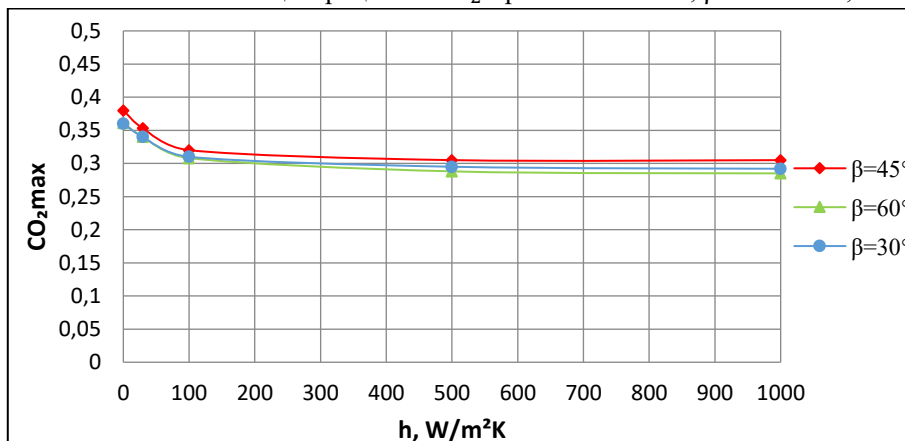
На фигура 7.23 е показано изменението на коефициента на полезно действие на горивния процес при различна концентрация на CO. Като от получената графика се вижда, че максимално К.П.Д. е при концентрация близка до 15mg/Nm^3 .



Фиг. 7.23. Изменение на коефициента на полезно действие при различна концентрация на CO.



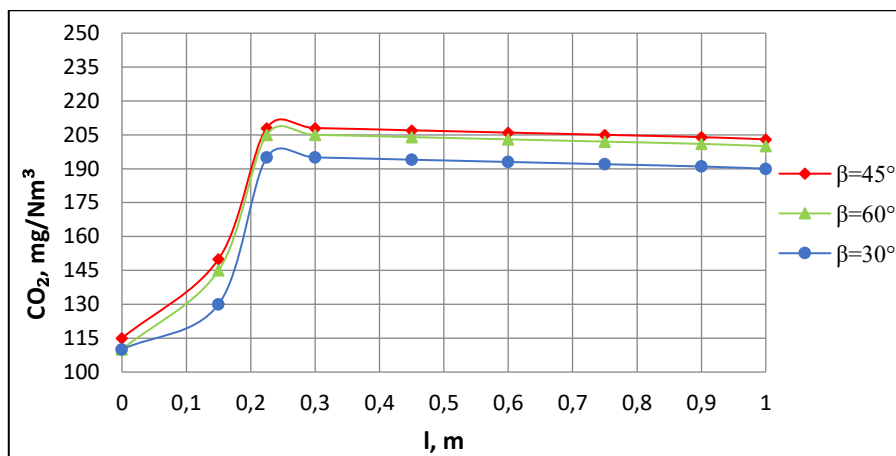
Фиг. 7.30. Масова концентрация на CO₂ при $h=30\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=45^\circ$ и $d=0.8\text{mm}$.



Фиг. 7.32. Изменение на $CO_{2max} = f(h)$ при различни ъгли на наклон на дюзите и $d=0.8\text{mm}$.

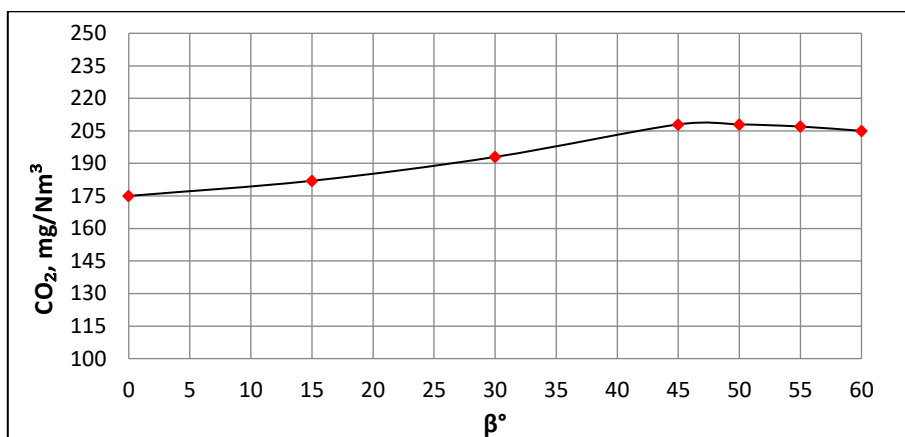
От фигурите за изменение на масовата концентрация на CO₂ по дължина на смесителната камера се вижда, че максимални стойности на CO₂ се получават при адиабатни условия и свободна конвекция. Формирането на максимална концентрация CO₂ се наблюдава отново в диапазона 150 ÷ 300mm.

На фигураа 7.32 в графичен вид е показано изменението на концентрацията на CO₂ при различна интензивност на топлообмен през стените на камерата при различни ъгли на наклон на дюзите. От фигурата може да се обобщи, че при ъгъл $\beta=45^\circ$ се образуват максимални концентрации на CO₂, което може да се комбинира с ниво на топлоотвеждане - адиабатни условия или свободна конвекция.



Фиг. 7.33. Изменение концентрацията на CO_2 по дължина на смесителя при различни стойности на β , $d=0,8\text{mm}$ и $h=30\text{W/m}^2\text{K}$.

На фигури 7.33 и 7.34 графично са показани осреднени стойности от получени резултати от натурни експерименти в лабораторна среда. Експерименталните измервания са извършени с газоанализатор “Testo 300M”, получени са стойности за концентрацията на CO_2 в различни сечения по дължина на смесителната камера и при различен ъгъл на наклон на газовите дюзи.



Фиг. 7.34. Изменение концентрацията на CO_2 в зависимост от ъгъла на наклон на газовите дюзи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В дисертационния труд експериментално е изследвана газодинамиката на инжектирана завъртяна струя в ограничено пространство при изотермични условия. От резултатите получени при експерименталните изследвания може да се заключи, че при завъртените течения затихването на максималната стойност на аксиалната скоростна компонента е предпоставка за образуване на приосеви циркуляционни зони.

Представеният числен модел на горивен процес, може да бъде използван при проектирането или реконструкция на горивни устройства, като се търси оптимален вариант между пълнота на горене и образуване на вредни емисии.

Научно приложни приноси от дисертационния труд

- Приложен е подход за комплексно (експериментално и числено) изследване на завъртяно струйно течение в ограничено (цилиндрично) пространство на база на предварителен регресионен анализ.
- Получени са потвърдителни нови данни относно приложение на завъртяно течение с цел повишаване на масо- топлообмена в смесителна вихрова камера.
- Доказана е по опитен път валидация на приложените програмни продукти при конкретния случай на струйно течение.
- Доказвани са с нови данни, получени чрез симулационно изследване на влиянието на преноса на топлина през ограждащата повърхност върху обменните процеси и ефективността на горивния процес.
- Получени са потвърдителни резултати за въздействието на завъртяното течение върху образуване на въглеродни оксиди.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Neven J. Krystev, Ivan A. Petrov, „Methodical sequence in modeling and simulation of burning process at gas fuel combustion“, доклад, изнесен на 18-та Национална конференция с международно участие „Образователни технологии 2022“, Каварна, 2022г., публикуван в сп. „Известие на съюза на учените-Сливен“, ISSN: 1311-2864, том 37 (2), стр. 81-86, 2022г.
2. Невен Кръстев, Иван Петров, Марин Давидов, Димитър Кисьов, „Последователност при симулационно моделиране на горивен процес при изгаряне на газово гориво“, сп. „Механика на машините“, ISSN: 0861-9727, бр. 132, кн. 2, стр. 80-85, 2024г.
3. Ivan A. Petrov, „Regression analysis of experimental data in a study of the performance of a flat flame burner“, статия в реферирано и индексирано в международната база данни списание “Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal“ ISSN: 1429-6675, 2024;27(2):89-104, <https://doi.org/10.33223/epj/185719>.
4. Иван Антонов Петров, Невен Йорданов Кръстев, „Лабораторна инсталация за изследване на аеродинамичните параметри на инжектирана завъртяна струя“, доклад изнесен на „Юбилейна XXV конференция за студентско научно творчество“, секция „Докторанти“, публикуван в „БСУ – Годишник“, ISSN: 1311-221X, том XLIX, стр. 80 - 86, Бургас, 2024г.
5. Neven Krystev, Ivan Petrov, „Influence of heat flux density on combustion efficiency in the initial torch section“, статия публикувана в „Proceedings of the Technical University of Sofia“, ISSN: 2738-8549, 2738-8530, том 74, №3, 2024г., <https://doi.org/10.47978/TUS.2024.74.03.005>.
6. Ivan Petrov, Neven Krystev, „Influence of mode and design parameters on the combustion efficiency of injected rotary jet“, доклад изнесен на „63-та Научна Конференция на Русенски Университет „Ангел Кънчев“ и Съюз на учените – Русе“, публикуван в „Proceedings of University of Ruse“, ISSN: 1311-3321 (print), ISSN: 2535-1028 (CD-ROM), ISSN: 2603-4123 (on-line), том 63, книга 1.1., стр. 143 - 148, Русе, 2024г.

POSSIBILITIES FOR INCREASING THE COMBUSTION EFFICIENCY OF INJECTED SWING JET

Ivan Antonov Petrov, M. Sc. Eng.

Abstract

The main task of this dissertation is aimed at improving and modernizing an existing laboratory installation, performing a series of experimental studies regarding the gas-dynamic and thermal characteristics of the flare, in order to improve combustion efficiency.

Optimization of combustion devices actually means appropriate selection of the relevant operating and design parameters, on which both the efficiency of using gas fuel and the amount of harmful emissions depend.

Given the difficulty that accompanies this type of research in real conditions - the presence of precise recording elements, interference, the long period of time and high costs, full-scale experiments are also combined with numerical modeling, with the possibility of validating the results.

Main scientific contributions of the thesis are:

- An approach for a complex (experimental and numerical) study of a swirling jet flow in a confined (cylindrical) space based on a preliminary regression analysis is applied.
- Confirmatory new data have been obtained regarding the application of swirling flow to enhance mass and heat transfer in a mixing vortex chamber.
- Validation of the applied software products in the specific case of jet flow has been experimentally proven.
- They have been proven with new data obtained through a simulation study of the influence of heat transfer through the enclosing surface on the exchange processes and the efficiency of the combustion process.
- Confirmatory results were obtained for the impact of the swirling flow on the formation of carbon oxides.



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ
ИНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ - СЛИВЕН

Катедра „Механика, машиностроене и топлотехника“

маг. инж. Иван Антонов Петров

ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ПОВИШАВАНЕ ЕФЕКТИВНОСТТА НА ГОРЕНЕ
НА ИНЖЕКТИРАНА ЗАВЪРТЯНА СТРУЯ

П Р И Л О Ж Е Н И Я

към дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"

Област - 5. Технически науки
Професионално направление - 5.4. Енергетика
Научна специалност - Теоретична топлотехника

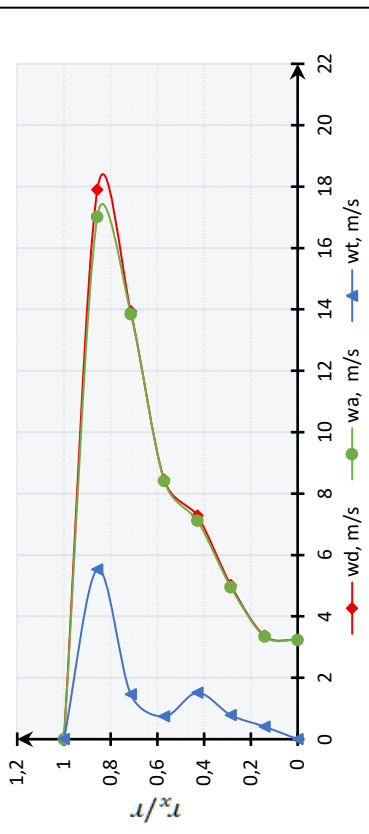
Научен ръководител: доц. д-р инж. Невен Йорданов Кръстев

Сливен 2025г.

Приложение №1

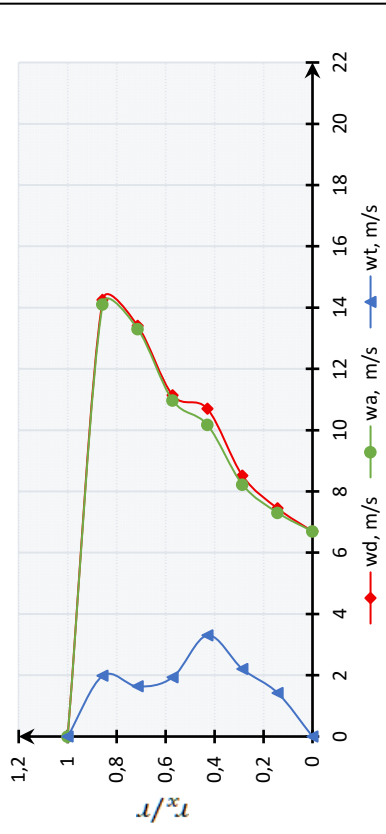
Дюза $d = 0,6\text{mm}$; $P_{\text{вх}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 15^\circ$; $L = 150\text{mm}$

$r_{\text{в}}, \text{mm}$	0	5	10	15	20	25	30	35
$r_{\text{в}}/r$	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	0	7	9	12	5	6	18	0
$p_{\text{в}}, \text{Pa}$	6,3	6,75	14,8	30,55	42,65	115,6	174,6	0
$w_{\text{в}}, \text{m/s}$	3,234	3,347	4,956	7,1208	8,4136	13,852	17,023	0
$\dot{w}_{\text{в}}, \text{m/s}$	3,234	3,372	5,018	7,2797	8,4457	13,928	17,898	0
$w_{\text{т}}, \text{m/s}$	0	0,411	0,785	1,5128	0,7357	1,4551	5,5282	0



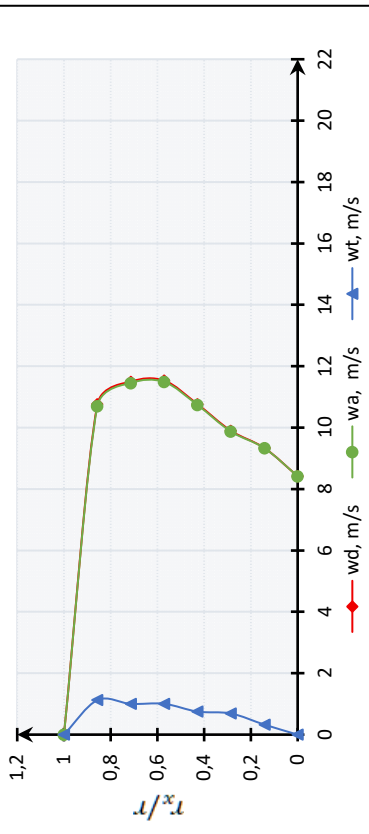
Дюза $d = 0,6\text{mm}$; $P_{\text{вх}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 15^\circ$; $L = 225\text{mm}$

$r_{\text{в}}, \text{mm}$	0	5	10	15	20	25	30	35
$r_{\text{в}}/r$	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	0	11	15	18	10	7	8	0
$p_{\text{в}}, \text{Pa}$	27	32,15	40,75	62,3	72,5	106,6	119,9	0
$w_{\text{в}}, \text{m/s}$	6,694	7,305	8,224	10,169	10,97	13,301	14,107	0
$\dot{w}_{\text{в}}, \text{m/s}$	6,694	7,441	8,514	10,691	11,139	13,401	14,245	0
$w_{\text{т}}, \text{m/s}$	0	1,419	2,202	3,3022	1,9332	1,6324	1,9816	0



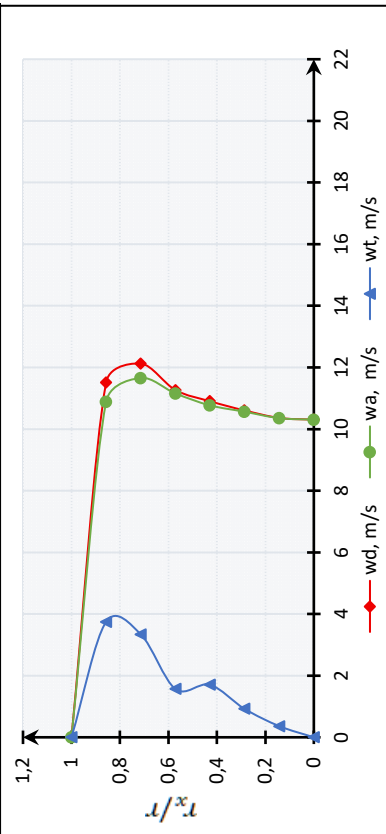
Дюза $d = 0,6\text{mm}$; $P_{\text{вх}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 15^\circ$; $L = 300\text{mm}$

$r_{\text{в}}, \text{mm}$	0	5	10	15	20	25	30	35
$r_{\text{в}}/r$	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	0	2	4	4	5	5	6	0
$p_{\text{в}}, \text{Pa}$	42,7	52,45	58,75	69,5	79,5	79	69	0
$w_{\text{в}}, \text{m/s}$	8,419	9,33	9,875	10,74	11,487	11,451	10,702	0
$\dot{w}_{\text{в}}, \text{m/s}$	8,419	9,336	9,899	10,766	11,531	11,494	10,76	0
$w_{\text{т}}, \text{m/s}$	0	0,326	0,69	0,7506	1,0045	1,0013	1,1242	0



Дюза $d = 0,6\text{mm}$; $P_{\text{вх}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 15^\circ$; $L = 450\text{mm}$

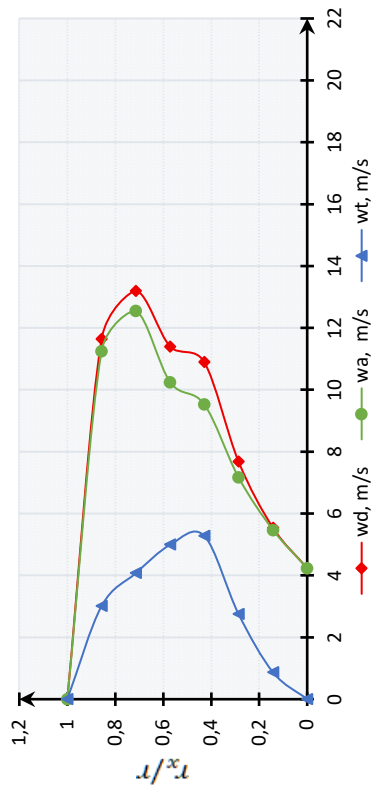
$r_{\text{в}}, \text{mm}$	0	5	10	15	20	25	30	35
$r_{\text{в}}/r$	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	0	2	5	9	8	16	19	0
$p_{\text{в}}, \text{Pa}$	64	64,6	67,25	69,9	75	81,9	71,4	0
$w_{\text{в}}, \text{m/s}$	10,31	10,35	10,56	10,771	11,157	11,659	10,886	0
$\dot{w}_{\text{в}}, \text{m/s}$	10,31	10,36	10,61	10,905	11,267	12,128	11,513	0
$w_{\text{т}}, \text{m/s}$	0	0,361	0,924	1,7051	1,5672	3,3414	3,7463	0



Приложение №2

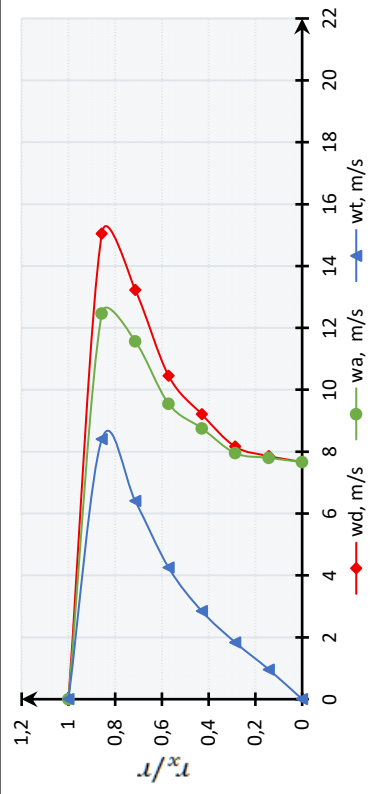
Дюза d = 0,6mm; P_{max} = 0,2MPa = 2bar; ρ = 1,2kg/m³; T = 25°C (298K); β = 30°; L = 150mm

r _x , mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r _x /r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
γ, °	0	9	21	29	26	18	15	0
p _в , Pa	10,8	18	30,95	54,7	63,2	94,9	76,2	0
w _в , m/s	4,234	5,466	7,167	9,5283	10,242	12,55	11,246	0
w _д , m/s	4,234	5,534	7,677	10,893	11,394	13,195	11,642	0
w _т , m/s	0	0,865	2,75	5,2784	4,9924	4,0756	3,0118	0



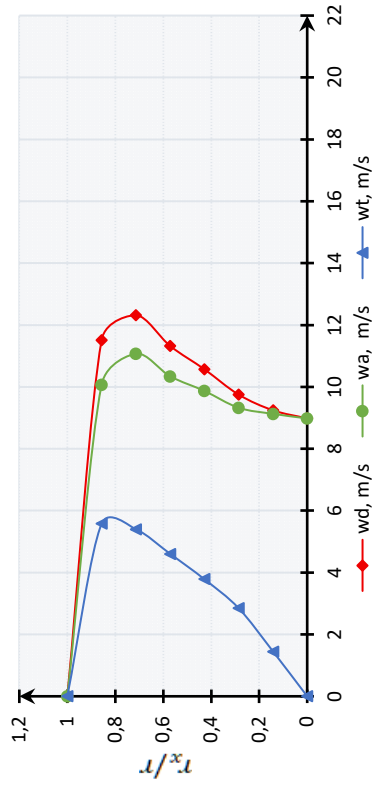
Дюза d = 0,6mm; P_{max} = 0,2MPa = 2bar; ρ = 1,2kg/m³; T = 25°C (298K); β = 30°; L = 225mm

r _x , mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r _x /r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
γ, °	0	7	13	18	24	29	34	0
p _в , Pa	35,4	36,65	38,1	46,2	54,9	80,6	93,7	0
w _в , m/s	7,665	7,799	7,952	8,7567	9,5457	11,566	12,471	0
w _д , m/s	7,665	7,858	8,161	9,2069	10,448	13,222	15,039	0
w _т , m/s	0	0,957	1,835	2,8437	4,2476	6,4073	8,4061	0



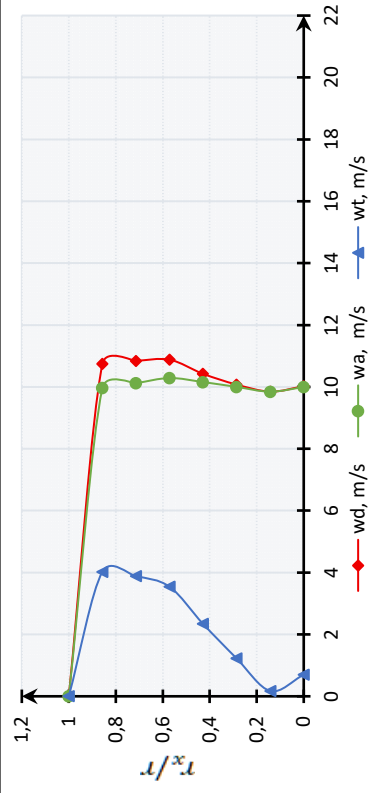
Дюза d = 0,6mm; P_{max} = 0,2MPa = 2bar; ρ = 1,2kg/m³; T = 25°C (298K); β = 30°; L = 300mm

r _x , mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r _x /r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
γ, °	0	9	17	21	24	26	29	0
p _в , Pa	48,6	50,2	52,4	58,7	64,45	73,9	61,1	0
w _в , m/s	8,981	9,128	9,326	9,8705	10,343	11,075	10,07	0
w _д , m/s	8,981	9,242	9,751	10,572	11,32	12,321	11,512	0
w _т , m/s	0	1,445	2,85	3,7868	4,6022	5,3985	5,5787	0

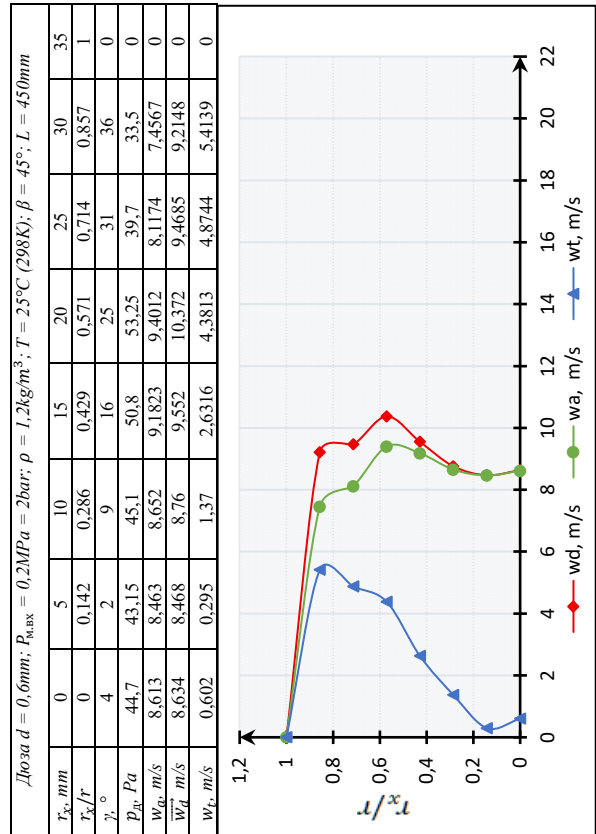
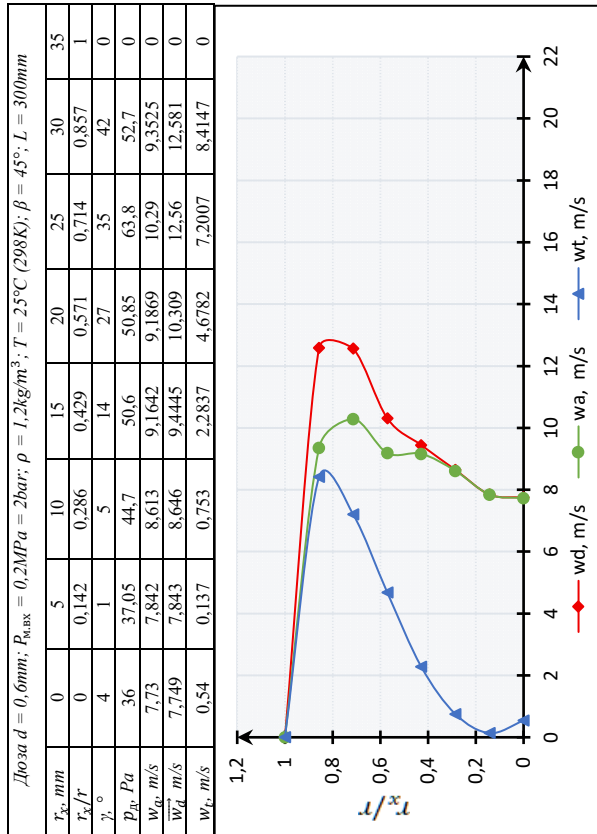
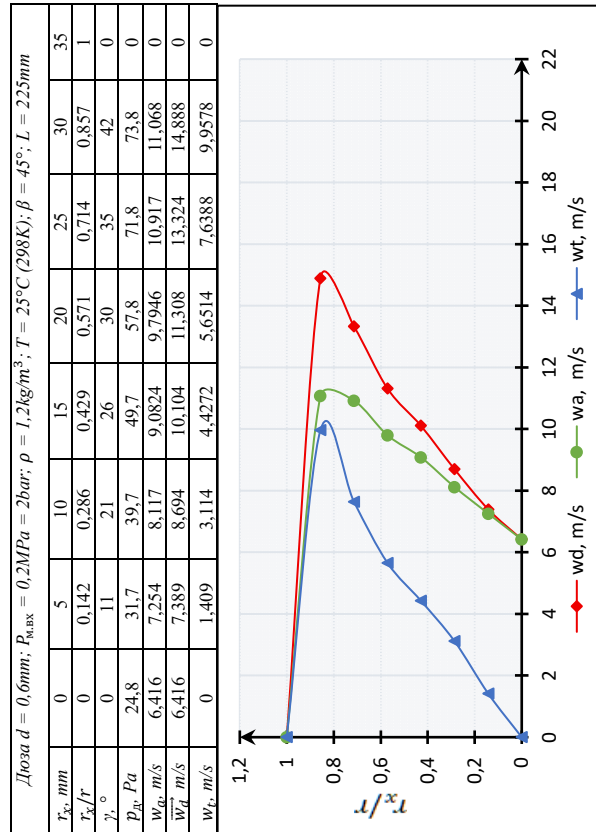
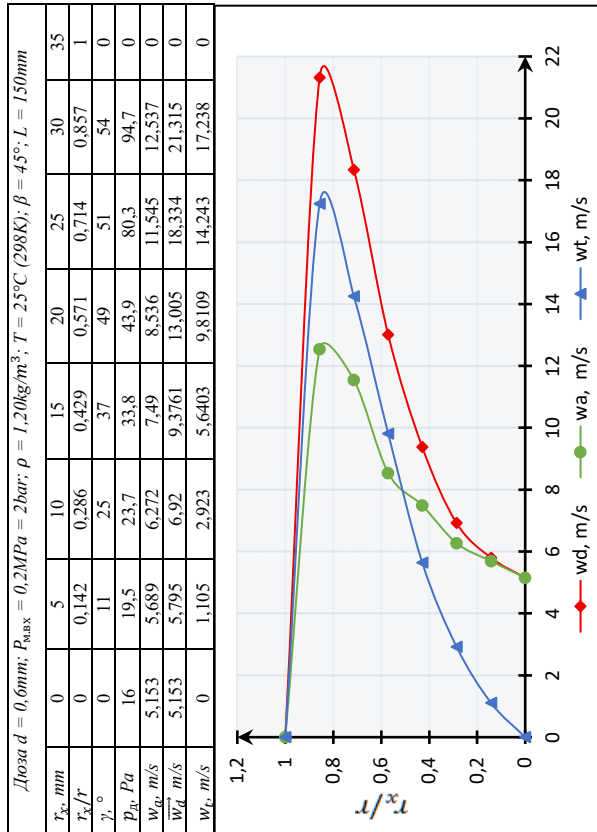


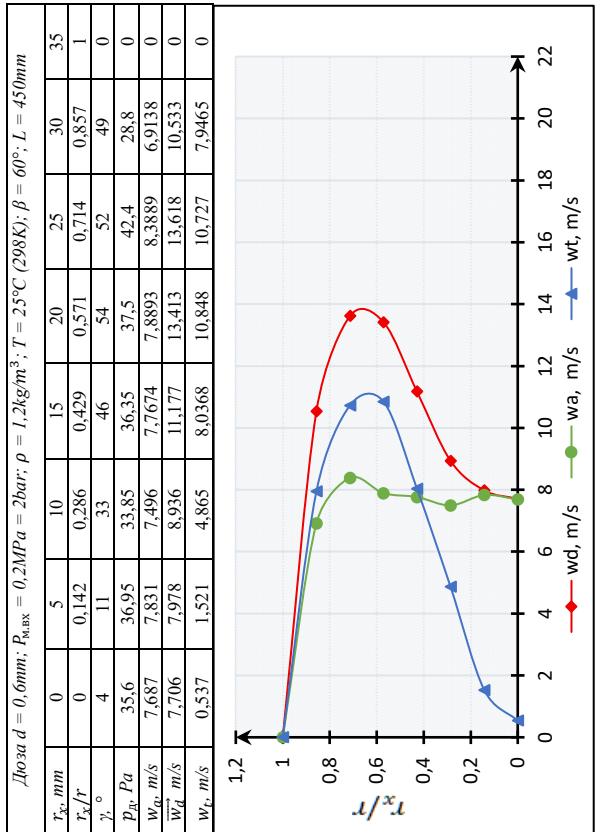
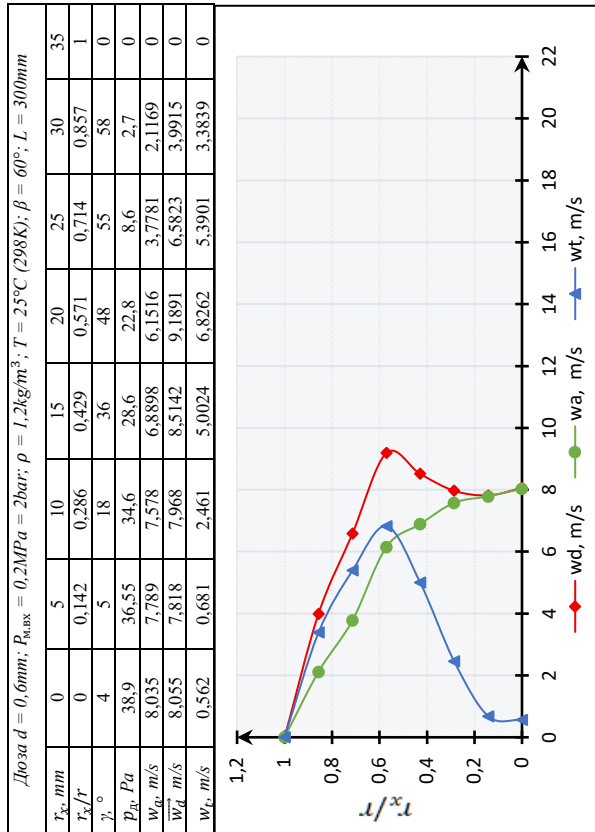
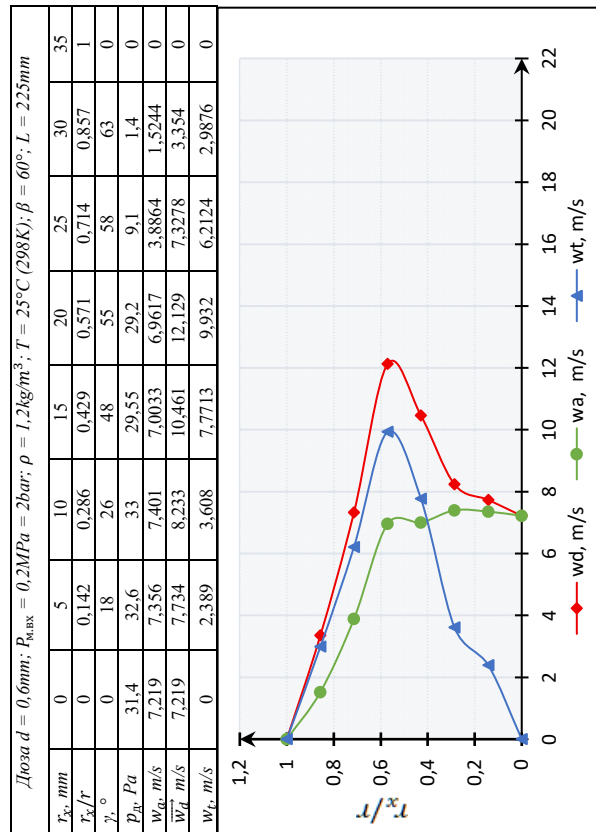
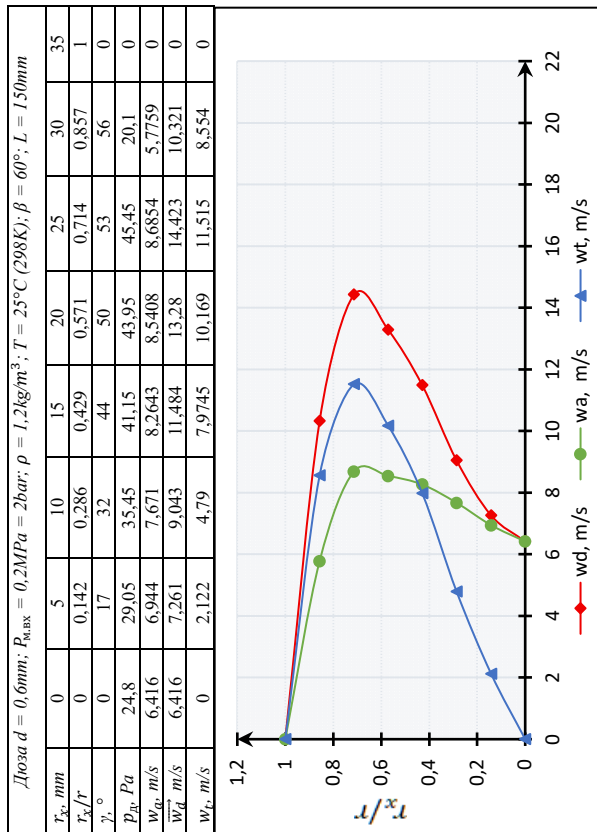
Дюза d = 0,6mm; P_{max} = 0,2MPa = 2bar; ρ = 1,2kg/m³; T = 25°C (298K); β = 30°; L = 450mm

r _x , mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r _x /r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
γ, °	4	1	7	13	19	21	22	0
p _в , Pa	60,2	58,4	60,25	62,15	63,75	61,7	59,8	0
w _в , m/s	9,996	9,845	10	10,156	10,286	10,12	9,9626	0
w _д , m/s	10,02	9,847	10,08	10,423	10,878	10,839	10,744	0
w _т , m/s	0,699	0,172	1,227	2,3436	3,5399	3,8824	4,0229	0



Приложение №3

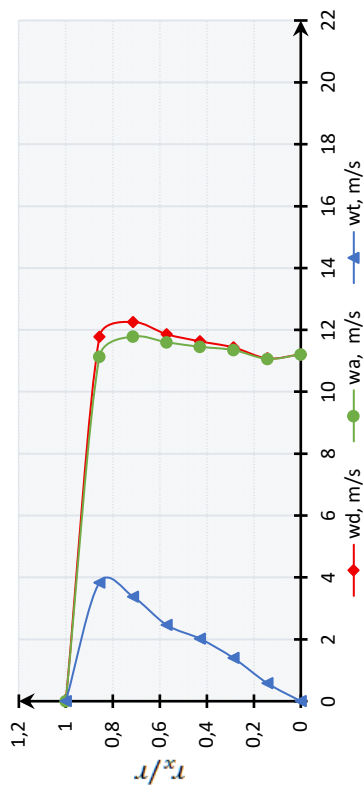




Приложение №5

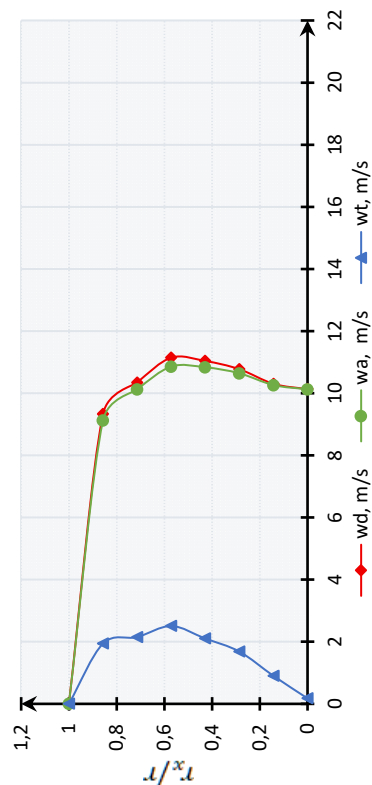
Дюза $d = 0,6\text{mm}$; $P_{\text{вх}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 15^\circ$; $L = 600\text{mm}$

r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	0	3	7	10	12	16	19	0
p_0, Pa	75,7	73,75	77,6	79,05	81,1	83,6	74,7	0
$w_0, \text{m/s}$	11,21	11,06	11,35	11,454	11,602	11,779	11,135	0
$\bar{w}_0, \text{m/s}$	11,21	11,08	11,43	11,631	11,861	12,254	11,776	0
$w_r, \text{m/s}$	0	0,58	1,393	2,0187	2,4648	3,3759	3,8319	0



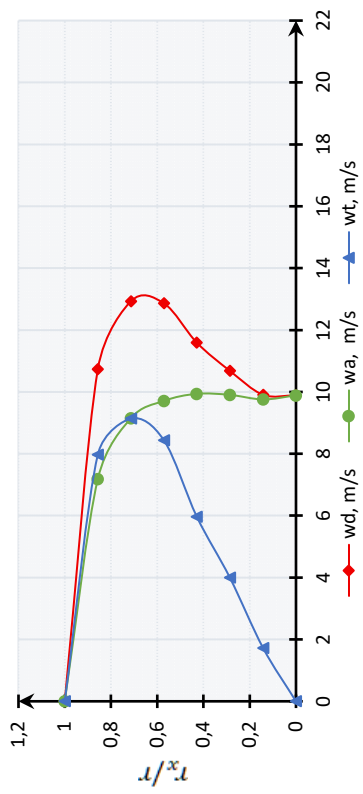
Дюза $d = 0,6\text{mm}$; $P_{\text{вх}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 30^\circ$; $L = 600\text{mm}$

r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	1	5	9	11	13	12	12	0
p_0, Pa	61,8	63,45	68,25	70,75	71,05	61,7	50,2	0
$w_0, \text{m/s}$	10,13	10,26	10,64	10,836	10,859	10,12	9,128	0
$\bar{w}_0, \text{m/s}$	10,13	10,3	10,78	11,039	11,145	10,345	9,3317	0
$w_r, \text{m/s}$	0,177	0,897	1,685	2,1053	2,5058	2,1499	1,9392	0



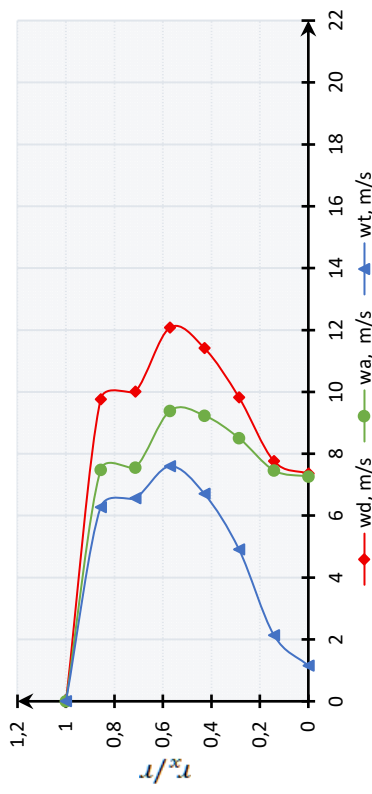
Дюза $d = 0,6\text{mm}$; $P_{\text{вх}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 45^\circ$; $L = 600\text{mm}$

r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	0	10	22	31	41	45	48	0
p_0, Pa	58,9	57,35	59,1	59,5	56,8	50,4	31,1	0
$w_0, \text{m/s}$	9,887	9,756	9,904	9,9376	9,7095	9,1461	7,1846	0
$\bar{w}_0, \text{m/s}$	9,887	9,907	10,68	11,592	12,861	12,929	10,732	0
$w_r, \text{m/s}$	0	1,719	3,999	5,9674	8,4341	9,1388	7,9725	0



Дюза $d = 0,6\text{mm}$; $P_{\text{вх}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 60^\circ$; $L = 600\text{mm}$

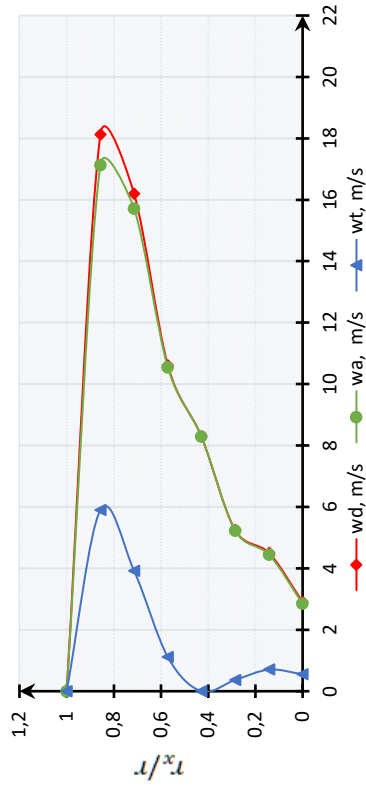
r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	9	16	30	36	39	41	40	0
p_0, Pa	31,8	33,55	43,6	51,4	53,1	34,4	33,7	0
$w_0, \text{m/s}$	7,265	7,462	8,507	9,2364	9,379	7,5562	7,4789	0
$\bar{w}_0, \text{m/s}$	7,355	7,763	9,821	11,414	12,077	10,009	9,7601	0
$w_r, \text{m/s}$	1,15	2,139	4,908	6,7061	7,5968	6,5637	6,271	0



Приложение №6

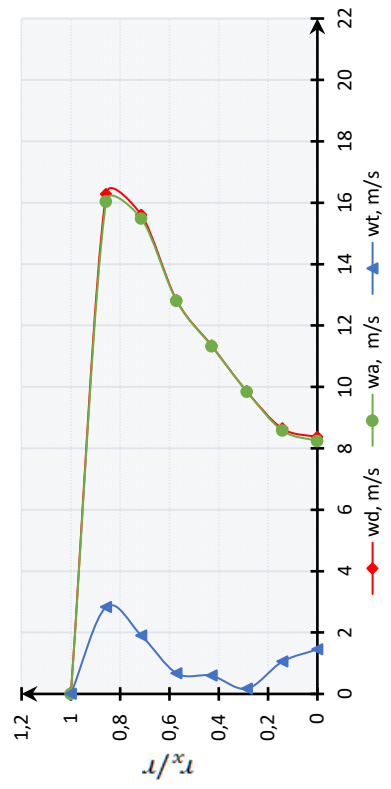
Дюза $d = 0,8\text{mm}$; $P_{\text{квк}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 15^\circ$; $L = 150\text{mm}$

$r_{\text{к}}, \text{mm}$	0	5	10	15	20	25	30	35
$r_{\text{к}}/r$	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	0	9	4	0	6	14	19	0
$p_{\text{к}}, \text{Pa}$	4,9	11,9	16,5	41,45	67	148,7	176,9	0
$w_{\text{к}}, \text{m/s}$	2,852	4,444	5,233	8,2944	10,545	15,71	17,135	0
$w_{\text{д}}, \text{m/s}$	2,905	4,5	5,246	8,2944	10,603	16,19	18,121	0
$w_{\text{т}}, \text{m/s}$	0,554	0,704	0,366	0	1,1078	3,9149	5,8968	0



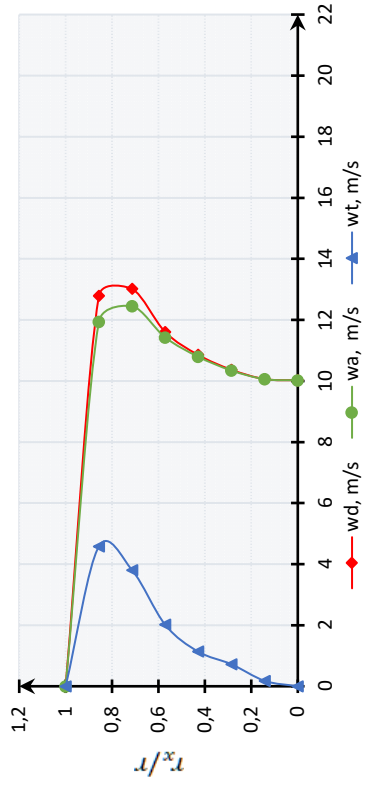
Дюза $d = 0,8\text{mm}$; $P_{\text{квк}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 15^\circ$; $L = 225\text{mm}$

$r_{\text{к}}, \text{mm}$	0	5	10	15	20	25	30	35
$r_{\text{к}}/r$	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	10	7	1	3	3	7	10	0
$p_{\text{к}}, \text{Pa}$	40,9	44,35	58,45	77,35	98,75	144,5	154,9	0
$w_{\text{к}}, \text{m/s}$	8,239	8,5796	9,8495	11,33	12,802	15,49	16,034	0
$w_{\text{д}}, \text{m/s}$	8,366	8,644	9,851	11,35	12,82	15,6	16,281	0
$w_{\text{т}}, \text{m/s}$	1,452	1,0529	0,1718	0,594	0,6706	1,901	2,8258	0



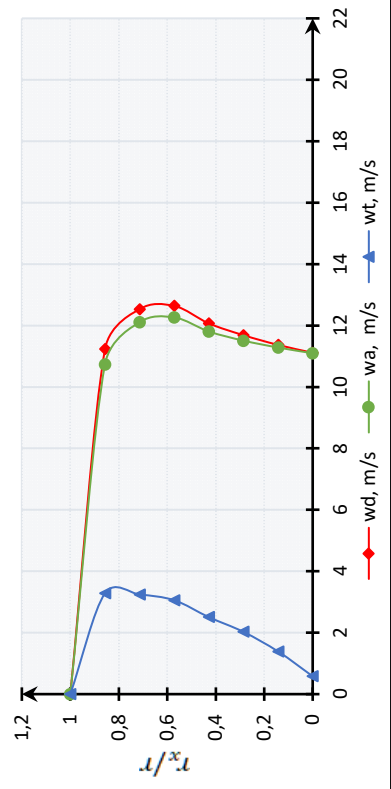
Дюза $d = 0,8\text{mm}$; $P_{\text{квк}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 15^\circ$; $L = 300\text{mm}$

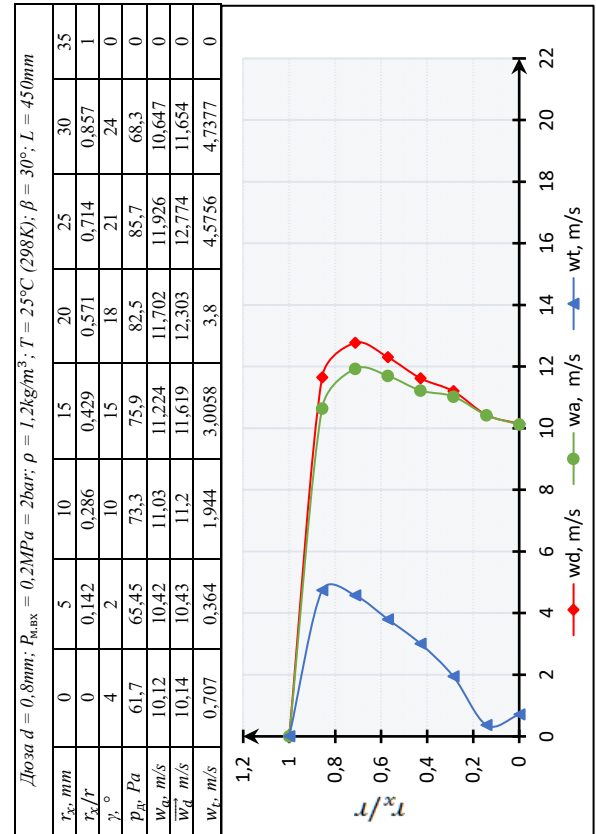
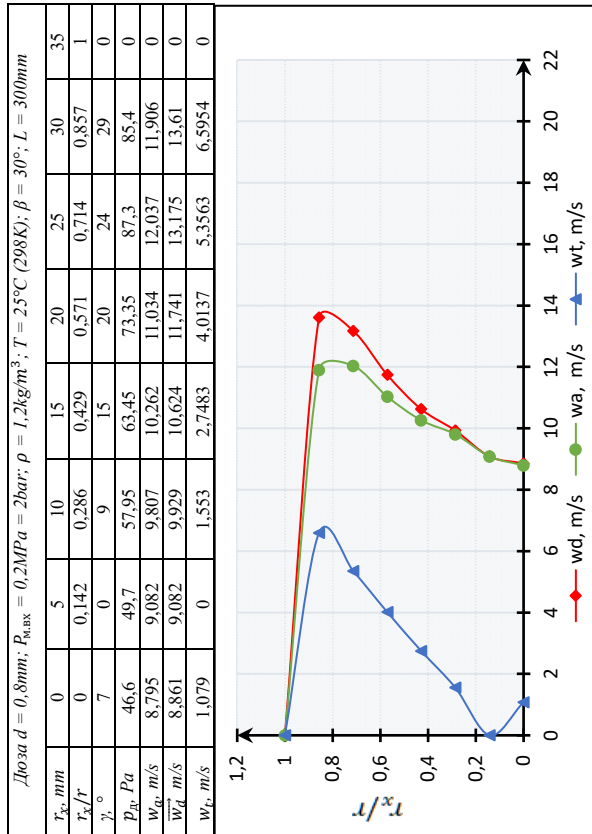
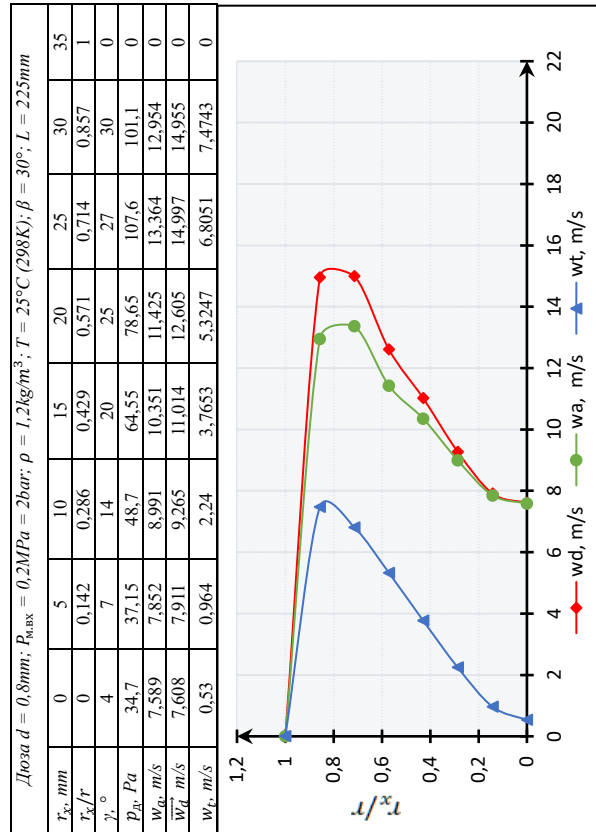
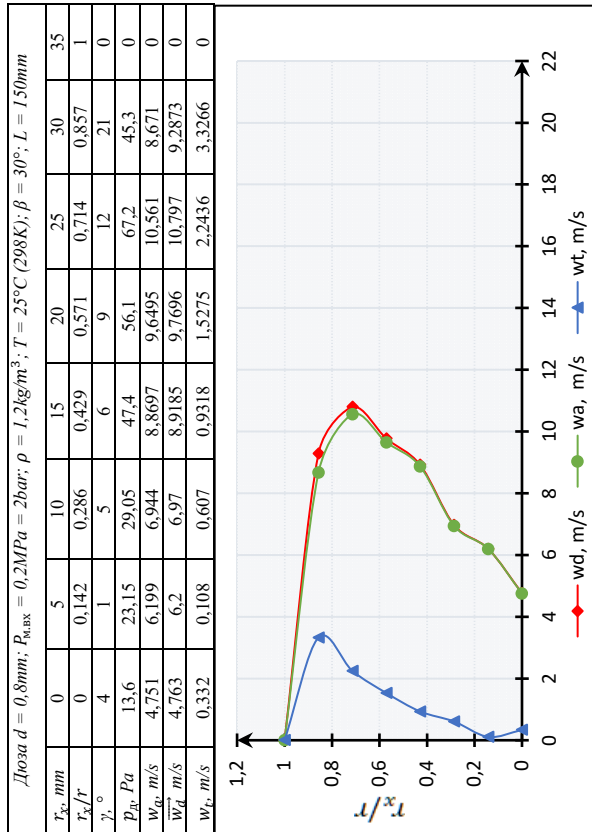
$r_{\text{к}}, \text{mm}$	0	5	10	15	20	25	30	35
$r_{\text{к}}/r$	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	0	1	4	6	10	17	21	0
$p_{\text{к}}, \text{Pa}$	60,5	60,95	64,45	70,2	78,65	93,4	85,8	0
$w_{\text{к}}, \text{m/s}$	10,02	10,06	10,34	10,794	11,425	12,451	11,933	0
$w_{\text{д}}, \text{m/s}$	10,02	10,06	10,37	10,854	11,601	13,019	12,782	0
$w_{\text{т}}, \text{m/s}$	0	0,175	0,723	1,1339	2,0136	3,8045	4,5783	0



Дюза $d = 0,8\text{mm}$; $P_{\text{квк}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 15^\circ$; $L = 450\text{mm}$

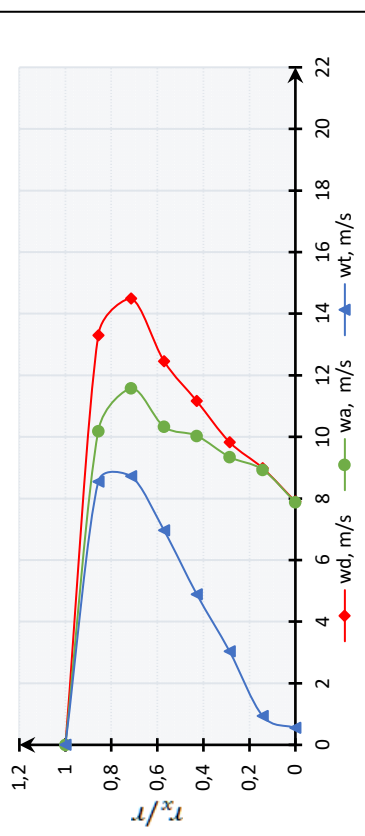
$r_{\text{к}}, \text{mm}$	0	5	10	15	20	25	30	35
$r_{\text{к}}/r$	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	3	7	10	12	14	15	17	0
$p_{\text{к}}, \text{Pa}$	74,2	76,7	79,8	84	90,6	88,3	69,5	0
$w_{\text{к}}, \text{m/s}$	11,1	11,28	11,51	11,808	12,263	12,106	10,74	0
$w_{\text{д}}, \text{m/s}$	11,11	11,37	11,69	12,071	12,638	12,533	11,23	0
$w_{\text{т}}, \text{m/s}$	0,581	1,385	2,028	2,5085	3,0558	3,2421	3,2819	0





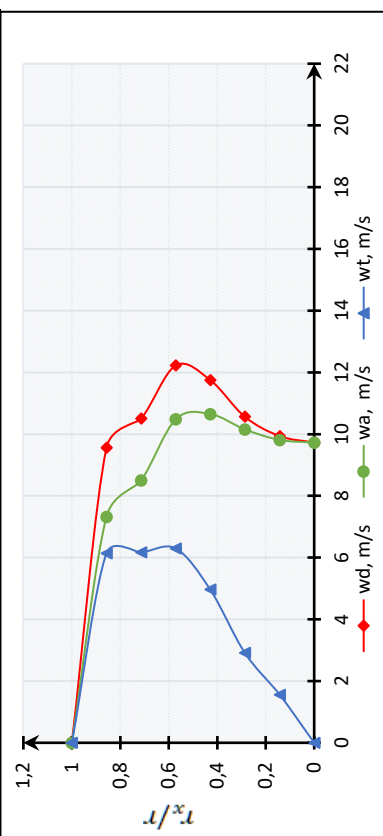
Дюза $d = 0,8\text{mm}$; $P_{\text{max}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 45^\circ$; $L = 300\text{mm}$

r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	4	6	18	26	34	37	40	0
p_w, Pa	37,4	48,1	52,65	60,7	64,3	80,8	62,6	0
$w_a, \text{m/s}$	7,879	8,935	9,348	10,037	10,331	11,58	10,193	0
$w_d, \text{m/s}$	7,898	8,984	9,829	11,166	12,458	14,497	13,302	0
$w_r, \text{m/s}$	0,551	0,939	3,036	4,8926	6,9636	8,7206	8,5469	0



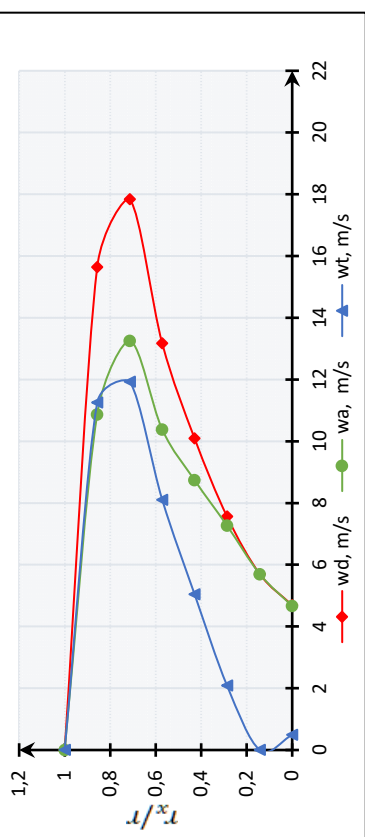
Дюза $d = 0,8\text{mm}$; $P_{\text{max}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 45^\circ$; $L = 450\text{mm}$

r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	0	9	16	25	31	36	40	0
p_w, Pa	57	58	62,1	68,35	66,2	43,5	32,3	0
$w_a, \text{m/s}$	9,727	9,812	10,15	10,651	10,482	8,497	7,3219	0
$w_d, \text{m/s}$	9,727	9,934	10,56	11,751	12,227	10,5	9,5552	0
$w_r, \text{m/s}$	0	1,553	2,91	4,9638	6,2944	6,1693	6,1394	0



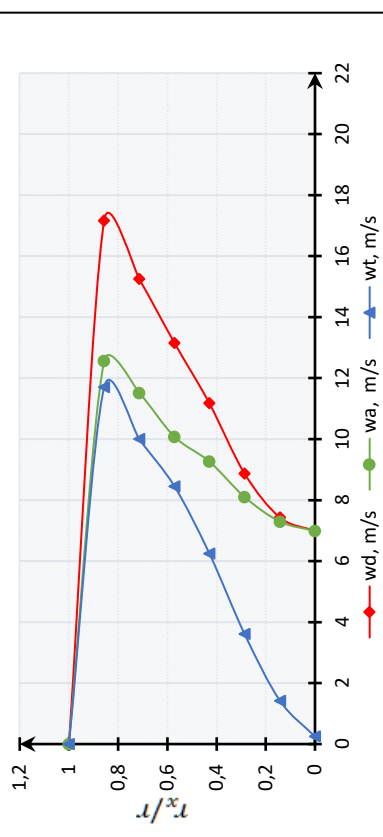
Дюза $d = 0,8\text{mm}$; $P_{\text{max}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,20\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 45^\circ$; $L = 150\text{mm}$

r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	6	0	16	30	38	42	46	0
p_w, Pa	13,1	19,55	31,8	46,05	64,9	105,9	71,2	0
$w_a, \text{m/s}$	4,663	5,696	7,265	8,7425	10,379	13,258	10,871	0
$w_d, \text{m/s}$	4,689	5,696	7,557	10,093	13,167	17,834	15,643	0
$w_r, \text{m/s}$	0,49	0	2,082	5,0444	8,1031	11,928	11,248	0



Дюза $d = 0,8\text{mm}$; $P_{\text{max}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 45^\circ$; $L = 225\text{mm}$

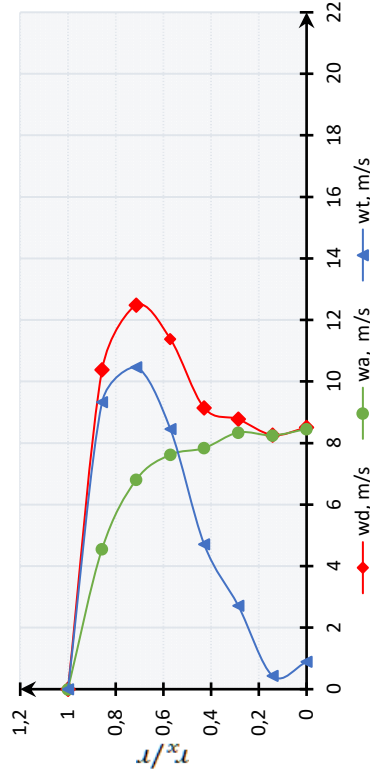
r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	2	11	24	34	40	41	43	0
p_w, Pa	29,4	32,05	39,55	51,7	61,2	79,8	95	0
$w_a, \text{m/s}$	6,985	7,293	8,102	9,2633	10,079	11,509	12,557	0
$w_d, \text{m/s}$	6,99	7,43	8,868	11,171	13,153	15,244	17,163	0
$w_r, \text{m/s}$	0,244	1,417	3,605	6,2441	8,4508	9,997	11,701	0



Приложение №9

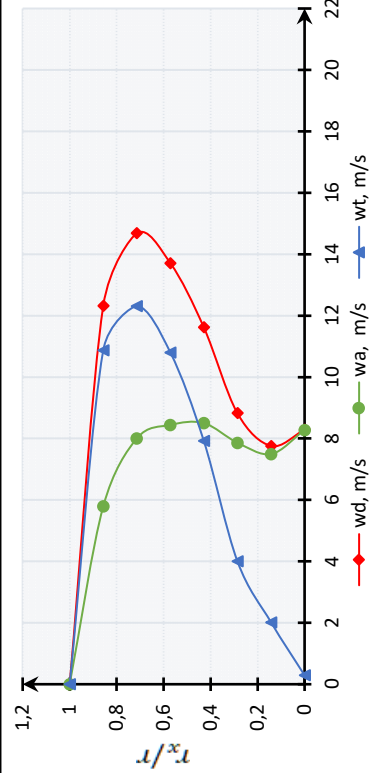
Дюза $d = 0,8\text{mm}$; $P_{\text{вх}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 60^\circ$; $L = 300\text{mm}$

r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	6	3	18	31	48	57	64	0
$p_{\text{в}}, \text{Pa}$	43,1	41	41,95	37	35	27,9	12,5	0
$w_a, \text{m/s}$	8,458	8,249	8,344	7,8365	7,6218	6,8049	4,5549	0
$w_d, \text{m/s}$	8,504	8,261	8,773	9,1408	11,385	12,485	10,378	0
$w_t, \text{m/s}$	0,889	0,432	2,71	4,7057	8,4576	10,467	9,3255	0



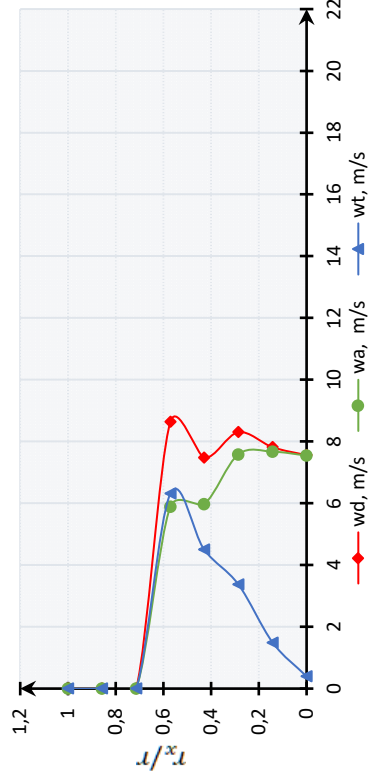
Дюза $d = 0,8\text{mm}$; $P_{\text{вх}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 60^\circ$; $L = 450\text{mm}$

r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	2	15	27	43	52	57	62	0
$p_{\text{в}}, \text{Pa}$	41,3	33,85	37,25	43,55	42,95	38,6	20,2	0
$w_a, \text{m/s}$	8,279	7,496	7,863	8,5019	8,4431	8,0041	5,7902	0
$w_d, \text{m/s}$	8,284	7,76	8,824	11,621	13,706	14,685	12,321	0
$w_t, \text{m/s}$	0,289	2,007	4,004	7,9221	10,796	12,312	10,875	0



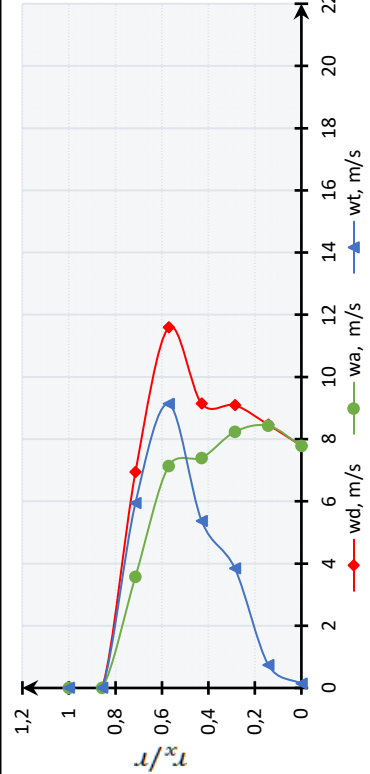
Дюза $d = 0,8\text{mm}$; $P_{\text{вх}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 60^\circ$; $L = 150\text{mm}$

r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	3	11	24	37	47	53	60	0
$p_{\text{в}}, \text{Pa}$	34,3	35,45	34,65	21,5	20,9	0	0	0
$w_a, \text{m/s}$	7,545	7,671	7,584	5,9737	5,8897	0	0	0
$w_d, \text{m/s}$	7,556	7,814	8,3	7,478	8,6321	0	0	0
$w_t, \text{m/s}$	0,395	1,49	3,374	4,4984	6,3107	0	0	0



Дюза $d = 0,8\text{mm}$; $P_{\text{вх}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 60^\circ$; $L = 225\text{mm}$

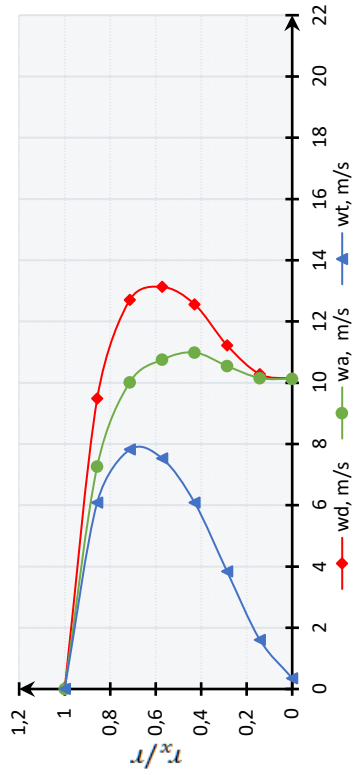
r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	1	5	25	36	52	59	62	0
$p_{\text{в}}, \text{Pa}$	36,5	42,8	40,9	32,95	30,7	7,7	0	0
$w_a, \text{m/s}$	7,783	8,428	8,239	7,3952	7,1382	3,5749	0	0
$w_d, \text{m/s}$	7,785	8,461	9,09	9,1388	11,588	6,9351	0	0
$w_t, \text{m/s}$	0,136	0,737	3,84	5,3693	9,1279	5,9426	0	0



Приложение №10

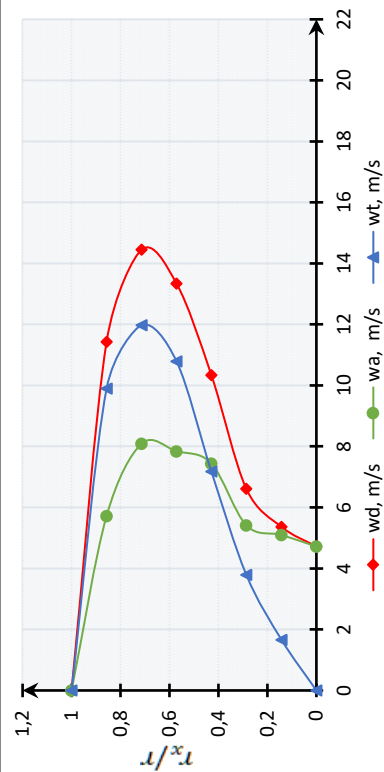
Дюза $d = 0,8\text{mm}$; $P_{\text{вax}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 45^\circ$; $L = 600\text{mm}$

r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	0	9	20	29	35	38	40	0
$p_{\text{в}}, \text{Pa}$	61,8	62,1	67	72,75	69,7	60,4	31,8	0
$w_a, \text{m/s}$	10,13	10,15	10,55	10,988	10,756	10,012	7,265	0
$w_d, \text{m/s}$	10,13	10,28	11,22	12,562	13,127	12,703	9,481	0
$w_r, \text{m/s}$	0,353	1,607	3,836	6,0873	7,5262	7,8172	6,0917	0



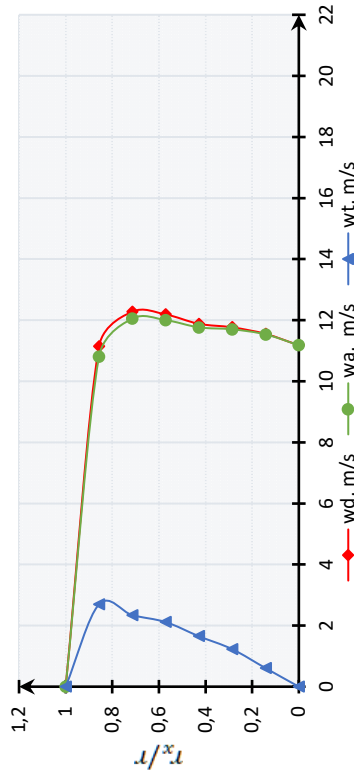
Дюза $d = 0,8\text{mm}$; $P_{\text{вax}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 60^\circ$; $L = 600\text{mm}$

r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	0	18	35	44	54	56	60	0
$p_{\text{в}}, \text{Pa}$	13,4	15,65	17,65	33,35	37,05	39,4	19,7	0
$w_a, \text{m/s}$	4,716	5,097	5,412	7,4399	7,8418	8,0867	5,7181	0
$w_d, \text{m/s}$	4,716	5,359	6,606	10,339	13,332	14,451	11,426	0
$w_r, \text{m/s}$	0	1,655	3,787	7,1791	10,782	11,976	9,892	0



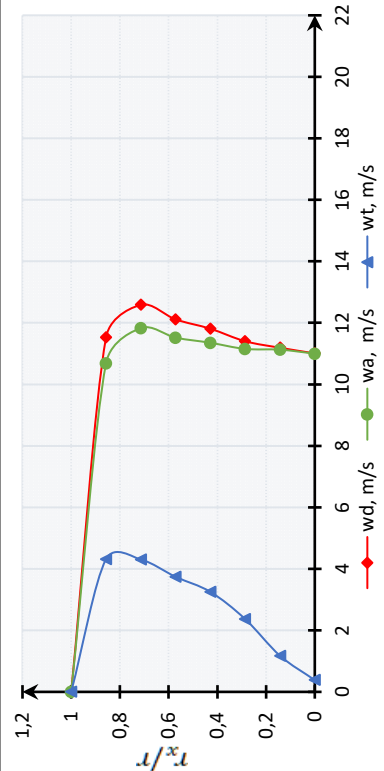
Дюза $d = 0,8\text{mm}$; $P_{\text{вax}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 15^\circ$; $L = 600\text{mm}$

r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	0	3	6	8	10	11	14	0
$p_{\text{в}}, \text{Pa}$	75,3	80,15	82,5	83,4	86,8	87,5	70,4	0
$w_a, \text{m/s}$	11,18	11,53	11,7	11,765	12,003	12,051	10,81	0
$w_d, \text{m/s}$	11,18	11,55	11,77	11,881	12,188	12,276	11,14	0
$w_r, \text{m/s}$	0	0,604	1,229	1,6527	2,1153	2,3413	2,6937	0

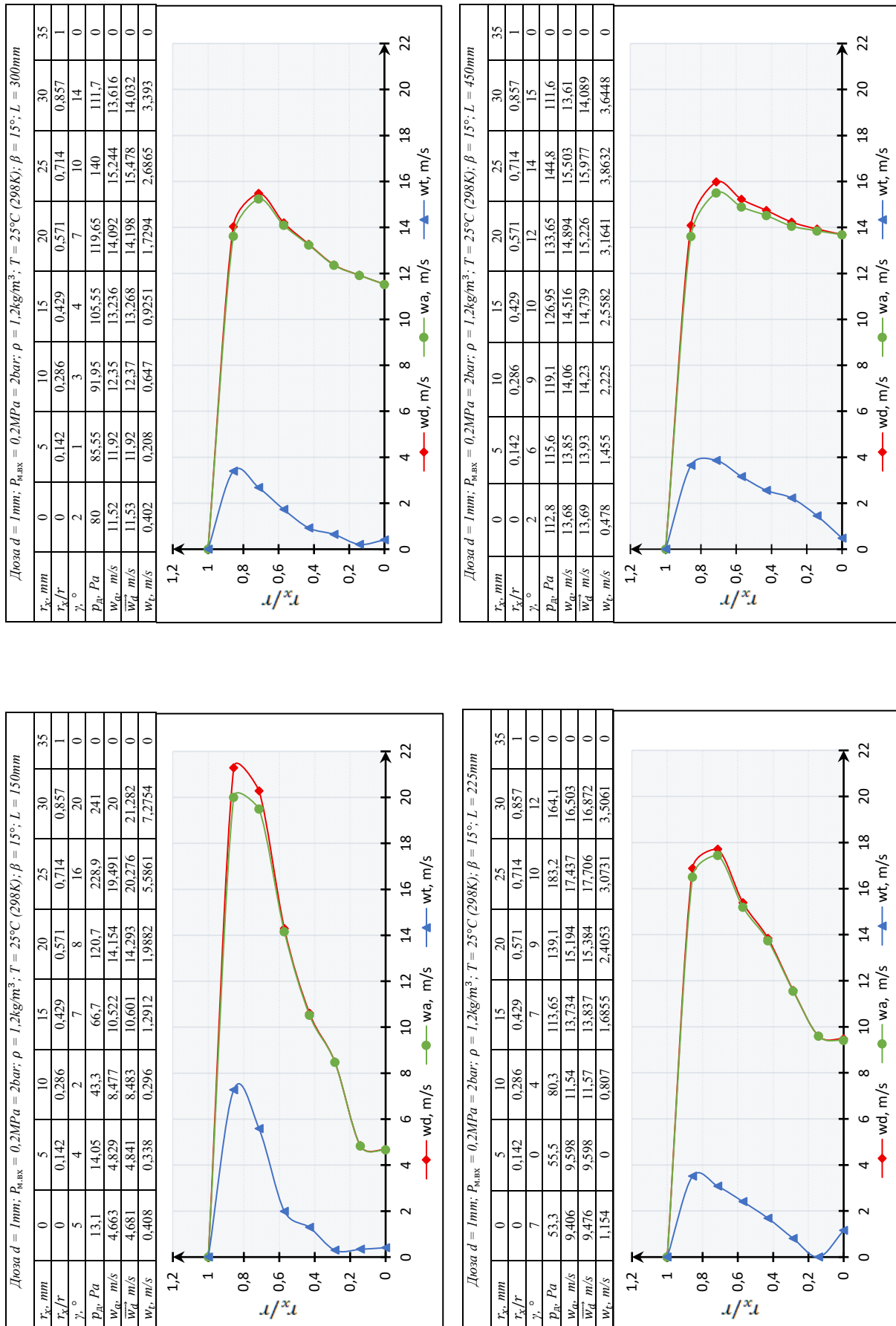


Дюза $d = 0,8\text{mm}$; $P_{\text{вax}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 30^\circ$; $L = 600\text{mm}$

r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	0	6	12	16	18	20	22	0
$p_{\text{в}}, \text{Pa}$	72,9	74,6	74,95	77,65	79,95	84,3	68,8	0
$w_a, \text{m/s}$	11	11,13	11,15	11,353	11,519	11,829	10,686	0
$w_d, \text{m/s}$	11,01	11,19	11,4	11,81	12,112	12,587	11,524	0
$w_r, \text{m/s}$	0,384	1,169	2,369	3,2535	3,7409	4,3029	4,315	0



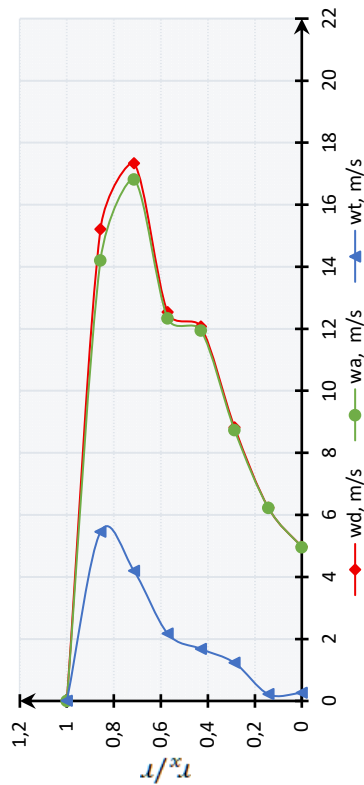
Приложение №11



Приложение №12

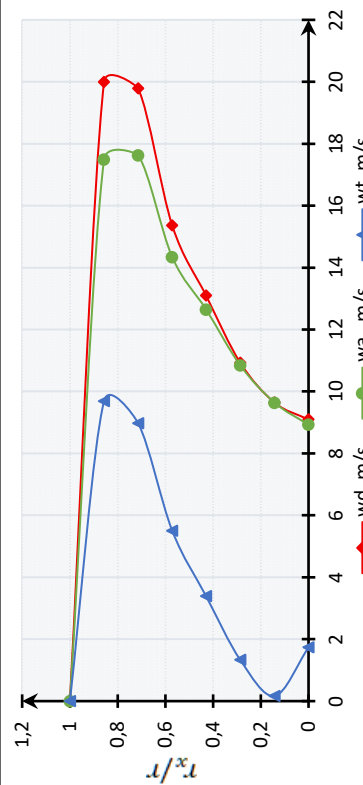
Дюза $d = 1\text{mm}$; $P_{\text{max}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 30^\circ$; $L = 150\text{mm}$

r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	3	2	8	8	10	14	21	0
$p_{\text{в}}, \text{Pa}$	14,8	23,35	45,95	86	91,75	170,4	121,5	0
$w_a, \text{m/s}$	4,956	6,225	8,733	11,947	12,34	16,817	14,201	0
$\bar{w}_d, \text{m/s}$	4,963	6,229	8,819	12,065	12,53	17,332	15,21	0
$w_r, \text{m/s}$	0,26	0,217	1,227	1,6782	2,1748	4,1908	5,4481	0



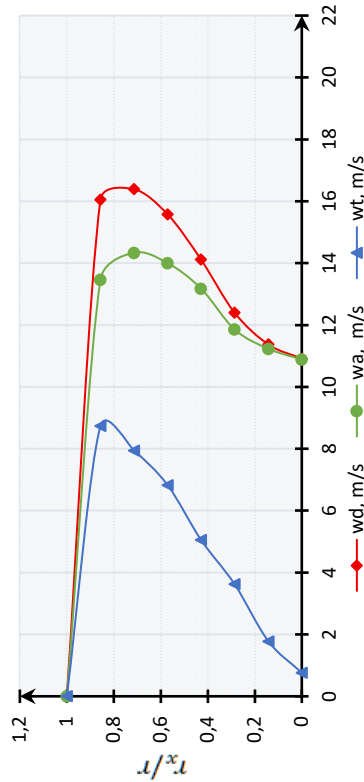
Дюза $d = 1\text{mm}$; $P_{\text{max}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 30^\circ$; $L = 225\text{mm}$

r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	11	1	7	15	21	27	29	0
$p_{\text{в}}, \text{Pa}$	48	55,95	70,85	96,35	123,85	187,2	184,3	0
$w_a, \text{m/s}$	8,926	9,637	10,84	12,646	14,337	17,627	17,49	0
$\bar{w}_d, \text{m/s}$	9,093	9,638	10,93	13,091	15,356	19,781	19,994	0
$w_r, \text{m/s}$	1,734	0,168	1,331	3,3866	5,5005	8,976	9,6889	0



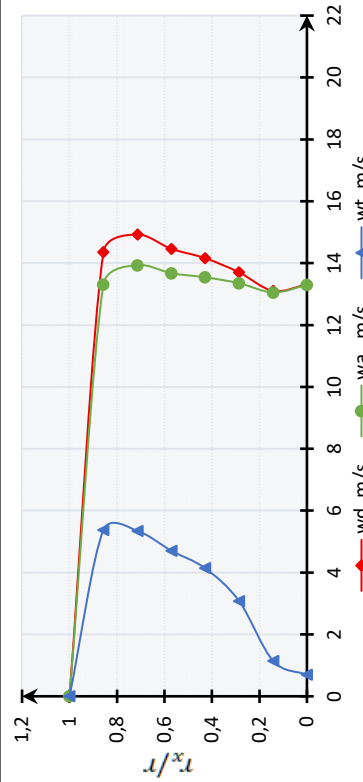
Дюза $d = 1\text{mm}$; $P_{\text{max}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 30^\circ$; $L = 300\text{mm}$

r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	4	9	17	21	26	29	33	0
$p_{\text{в}}, \text{Pa}$	71,4	76	84,7	104,65	118,1	123,8	109,2	0
$w_a, \text{m/s}$	10,89	11,23	11,86	13,179	14,001	14,334	13,463	0
$\bar{w}_d, \text{m/s}$	10,91	11,37	12,4	14,116	15,575	16,387	16,049	0
$w_r, \text{m/s}$	0,761	1,778	3,623	5,0562	6,8246	7,9409	8,7372	0



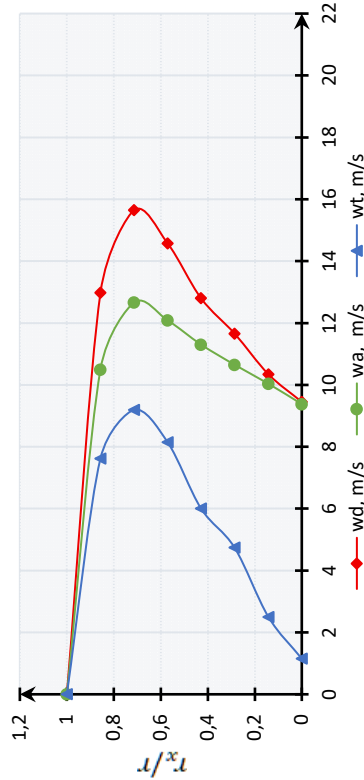
Дюза $d = 1\text{mm}$; $P_{\text{max}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 30^\circ$; $L = 450\text{mm}$

r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	3	5	13	17	19	21	22	0
$p_{\text{в}}, \text{Pa}$	106,5	102,7	107,4	110,5	112,65	116,9	106,8	0
$w_a, \text{m/s}$	13,3	13,05	13,35	13,543	13,674	13,929	13,314	0
$\bar{w}_d, \text{m/s}$	13,31	13,1	13,7	14,161	14,461	14,919	14,358	0
$w_r, \text{m/s}$	0,696	1,141	3,081	4,1382	4,7057	5,344	5,3762	0



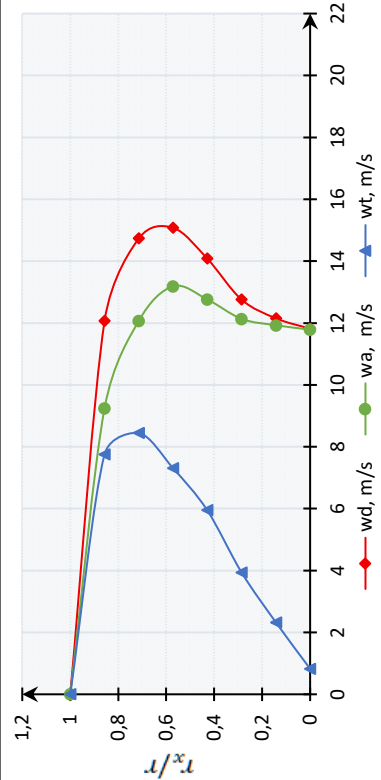
Дюза d = 1mm; P_{max} = 0,2MPa = 2bar; ρ = 1,2kg/m³; T = 25°C (298K); β = 45°; L = 300mm

<i>r_x, mm</i>	0	5	10	15	20	25	30	35
<i>r_x/r</i>	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
<i>γ, °</i>	7	14	24	28	34	36	36	0
<i>p_в, Pa</i>	53	60,7	68,35	77	88	96,6	66,4	0
<i>w_в, m/s</i>	9,379	10,04	10,65	11,305	12,085	12,662	10,498	0
<i>w_д, m/s</i>	9,449	10,34	11,66	12,802	14,573	15,648	12,973	0
<i>w_т, m/s</i>	1,151	2,501	4,739	6,0073	8,1464	9,1935	7,6221	0



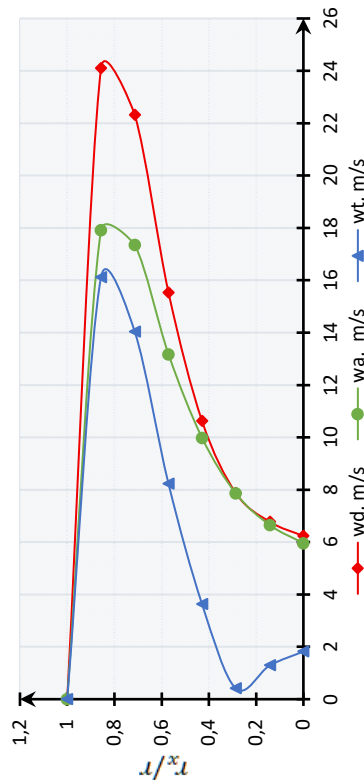
Дюза d = 1mm; P_{max} = 0,2MPa = 2bar; ρ = 1,2kg/m³; T = 25°C (298K); β = 45°; L = 450mm

<i>r_x, mm</i>	0	5	10	15	20	25	30	35
<i>r_x/r</i>	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
<i>γ, °</i>	4	11	18	25	29	35	40	0
<i>p_в, Pa</i>	83,7	85,7	88,7	98,15	104,75	87,8	51,5	0
<i>w_в, m/s</i>	11,79	11,93	12,13	12,763	13,186	12,072	9,2454	0
<i>w_д, m/s</i>	11,82	12,15	12,76	14,081	15,074	14,734	12,065	0
<i>w_т, m/s</i>	0,824	2,317	3,94	5,9482	7,3045	8,4471	7,7522	0



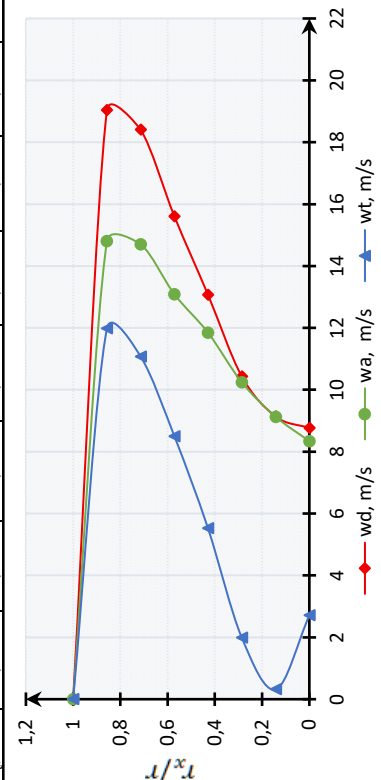
Дюза d = 1mm; P_{max} = 0,2MPa = 2bar; ρ = 1,20kg/m³; T = 25°C (298K); β = 45°; L = 150mm

<i>r_x, mm</i>	0	5	10	15	20	25	30	35
<i>r_x/r</i>	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
<i>γ, °</i>	17	11	3	20	32	39	42	0
<i>p_в, Pa</i>	21,4	26,65	37,25	60,05	104,55	181,3	193,3	0
<i>w_в, m/s</i>	5,96	6,651	7,863	9,9834	13,173	17,347	17,912	0
<i>w_д, m/s</i>	6,232	6,775	7,874	10,623	15,531	22,315	24,095	0
<i>w_т, m/s</i>	1,821	1,292	0,412	3,6317	8,2262	14,037	16,116	0



Дюза d = 1mm; P_{max} = 0,2MPa = 2bar; ρ = 1,2kg/m³; T = 25°C (298K); β = 45°; L = 225mm

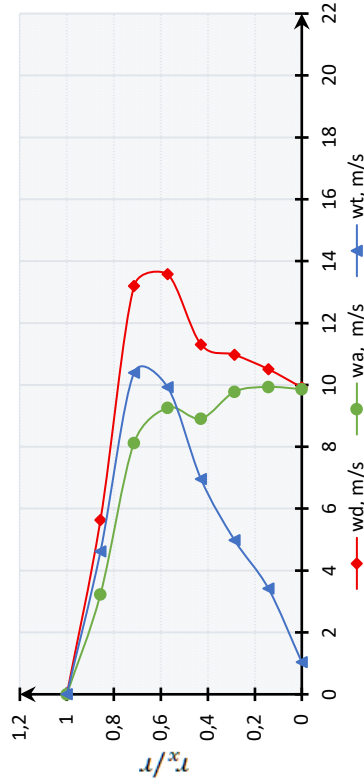
<i>r_x, mm</i>	0	5	10	15	20	25	30	35
<i>r_x/r</i>	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
<i>γ, °</i>	18	2	11	25	33	37	39	0
<i>p_в, Pa</i>	41,9	50,2	63,2	84,55	103,15	130,2	132	0
<i>w_в, m/s</i>	8,339	9,128	10,24	11,846	13,084	14,7	14,802	0
<i>w_д, m/s</i>	8,768	9,134	10,43	13,069	15,598	18,402	19,041	0
<i>w_т, m/s</i>	2,708	0,319	1,99	5,5208	8,4917	11,07	11,978	0



Приложение №14

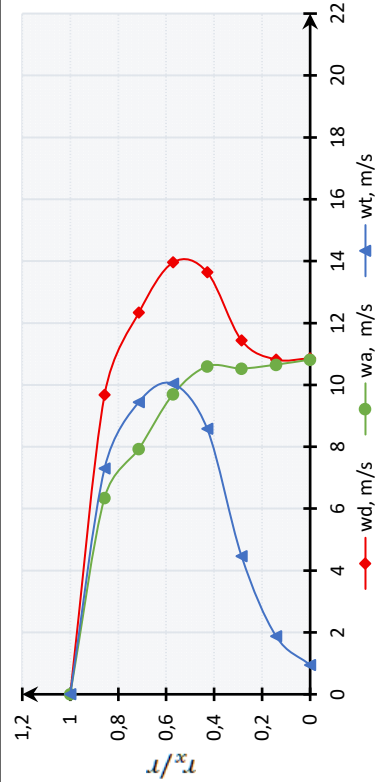
Дюза $d = 1\text{mm}$; $P_{\text{max}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 60^\circ$; $L = 300\text{mm}$

r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	6	19	27	38	47	52	55	0
$p_{\text{в}}, \text{Pa}$	58,6	59,45	57,6	47,85	51,7	39,8	6,3	0
$w_a, \text{m/s}$	9,862	9,933	9,778	8,917	9,2633	8,1276	3,2356	0
$\bar{w}_d, \text{m/s}$	9,916	10,51	10,97	11,306	13,577	13,194	5,6338	0
$w_r, \text{m/s}$	1,036	3,418	4,979	6,9578	9,9254	10,393	4,6133	0



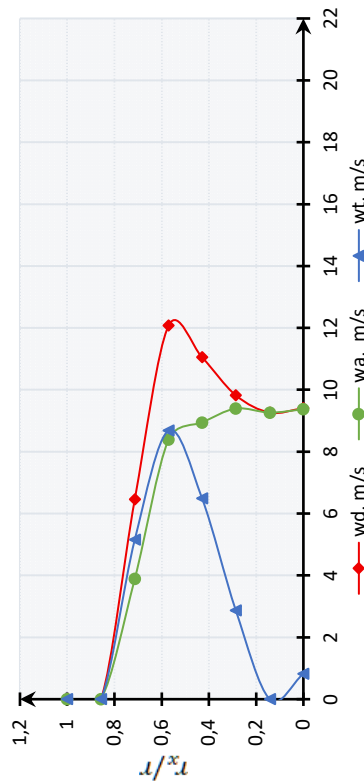
Дюза $d = 1\text{mm}$; $P_{\text{max}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 60^\circ$; $L = 450\text{mm}$

r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	5	10	23	39	46	50	49	0
$p_{\text{в}}, \text{Pa}$	70,5	68,4	66,8	67,7	56,7	37,9	24,3	0
$w_a, \text{m/s}$	10,82	10,65	10,53	10,6	9,7009	7,9312	6,3507	0
$\bar{w}_d, \text{m/s}$	10,86	10,82	11,44	13,636	13,959	12,332	9,6753	0
$w_r, \text{m/s}$	0,946	1,878	4,467	8,5779	10,037	9,4436	7,2993	0



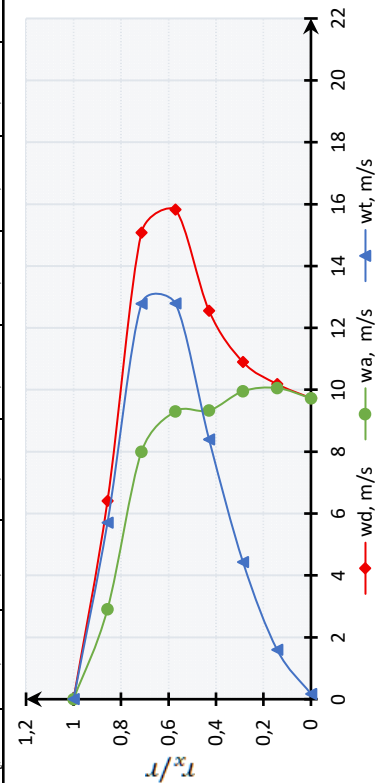
Дюза $d = 1\text{mm}$; $P_{\text{max}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 60^\circ$; $L = 150\text{mm}$

r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	5	0	17	36	46	53	57	0
$p_{\text{в}}, \text{Pa}$	52,9	51,7	53,15	48,15	42,4	9,1	0	0
$w_a, \text{m/s}$	9,37	9,263	9,392	8,9396	8,3889	3,8864	0	0
$\bar{w}_d, \text{m/s}$	9,406	9,263	9,821	11,047	12,071	6,4537	0	0
$w_r, \text{m/s}$	0,819	0	2,87	6,4907	8,6799	5,1523	0	0



Дюза $d = 1\text{mm}$; $P_{\text{max}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 60^\circ$; $L = 225\text{mm}$

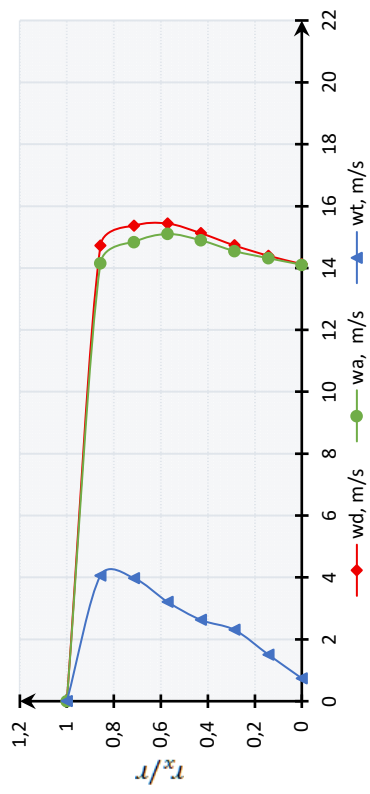
r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	1	9	24	42	54	58	63	0
$p_{\text{в}}, \text{Pa}$	57	60,95	59,7	52,45	52,15	38,5	5,1	0
$w_a, \text{m/s}$	9,727	10,06	9,954	9,3303	9,3035	7,9938	2,9094	0
$\bar{w}_d, \text{m/s}$	9,728	10,18	10,9	12,551	15,818	15,073	6,4015	0
$w_r, \text{m/s}$	0,17	1,592	4,429	8,3947	12,792	12,778	5,7022	0



Приложение №15

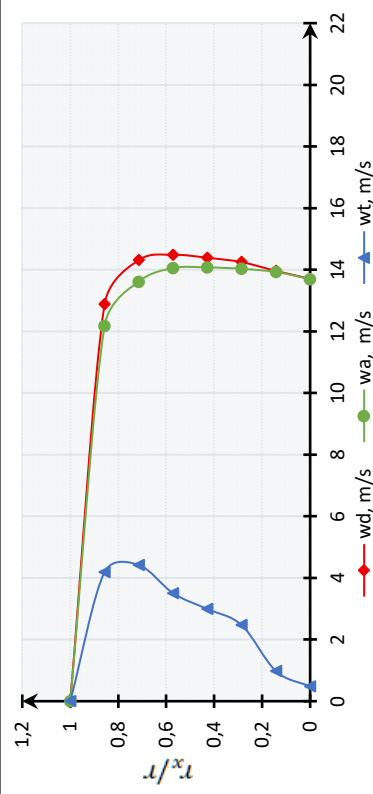
Дюза $d = 1\text{mm}$; $P_{\text{max}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 15^\circ$; $L = 600\text{mm}$

r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	3	6	9	10	12	15	16	0
$p_{\text{в}}, \text{Pa}$	119,9	123,5	127,5	133,65	137,4	132,7	120,7	0
$w_a, \text{m/s}$	14,11	14,32	14,55	14,894	15,101	14,841	14,154	0
$\bar{w}_d, \text{m/s}$	14,13	14,4	14,73	15,123	15,438	15,364	14,724	0
$w_r, \text{m/s}$	0,739	1,504	2,303	2,6248	3,2082	3,9745	4,0564	0



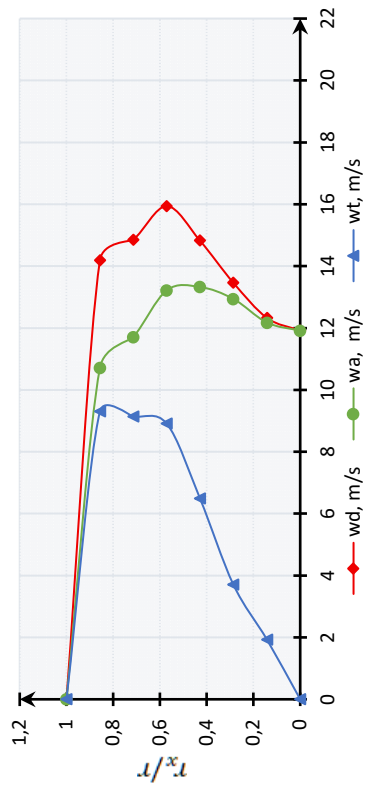
Дюза $d = 1\text{mm}$; $P_{\text{max}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 30^\circ$; $L = 600\text{mm}$

r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	2	4	10	12	14	18	19	0
$p_{\text{в}}, \text{Pa}$	113	116,9	118,6	119,35	119	111,6	89,3	0
$w_a, \text{m/s}$	13,69	13,93	14,03	14,074	14,054	13,61	12,174	0
$\bar{w}_d, \text{m/s}$	13,7	13,96	14,25	14,389	14,484	14,31	12,875	0
$w_r, \text{m/s}$	0,478	0,973	2,473	2,9901	3,5022	4,4197	4,1897	0



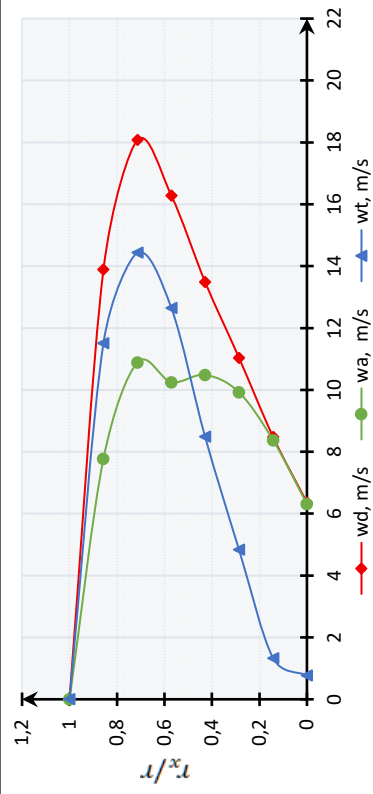
Дюза $d = 1\text{mm}$; $P_{\text{max}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 45^\circ$; $L = 600\text{mm}$

r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	0	9	16	26	34	38	41	0
$p_{\text{в}}, \text{Pa}$	85,5	89,3	100,9	107	105,25	82,6	69,1	0
$w_a, \text{m/s}$	11,91	12,17	12,94	13,326	13,217	11,709	10,709	0
$\bar{w}_d, \text{m/s}$	11,91	12,33	13,46	14,825	15,939	14,855	14,185	0
$w_r, \text{m/s}$	0	1,927	3,709	6,4959	8,9092	9,1416	9,3026	0

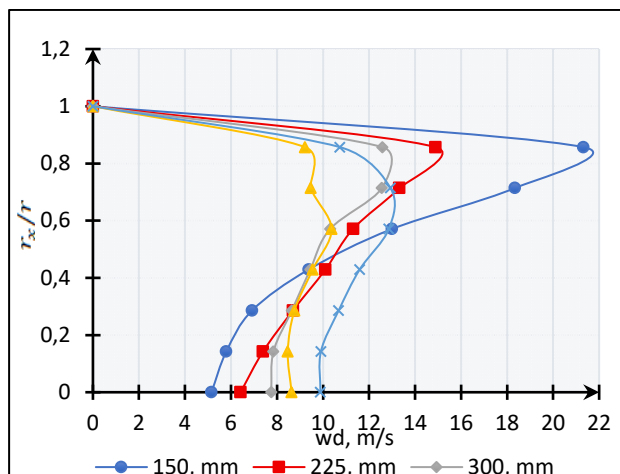


Дюза $d = 1\text{mm}$; $P_{\text{max}} = 0,2\text{MPa} = 2\text{bar}$; $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$; $T = 25^\circ\text{C}$ (298K); $\beta = 60^\circ$; $L = 600\text{mm}$

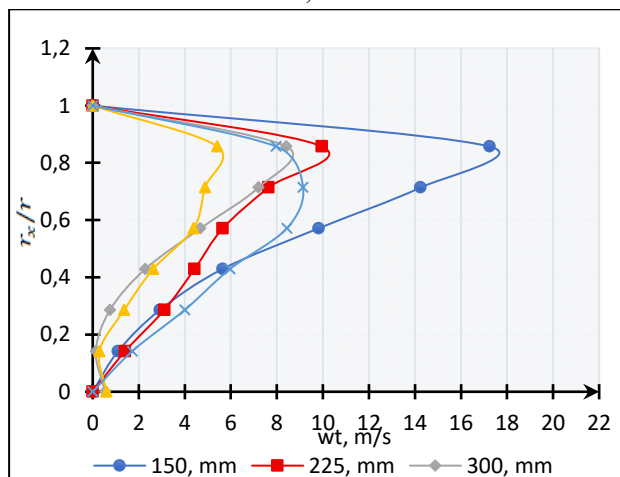
r_x, mm	0	5	10	15	20	25	30	35
r_x/r	0	0,142	0,286	0,429	0,571	0,714	0,857	1
$\gamma, ^\circ$	7	9	26	39	51	53	56	0
$p_{\text{в}}, \text{Pa}$	24	42,2	59,3	66,25	63,3	71,4	36,4	0
$w_a, \text{m/s}$	6,311	8,369	9,921	10,486	10,25	10,886	7,727	0
$\bar{w}_d, \text{m/s}$	6,359	8,473	11,04	13,489	16,278	18,077	13,89	0
$w_r, \text{m/s}$	0,775	1,325	4,836	8,4855	12,646	14,432	11,511	0



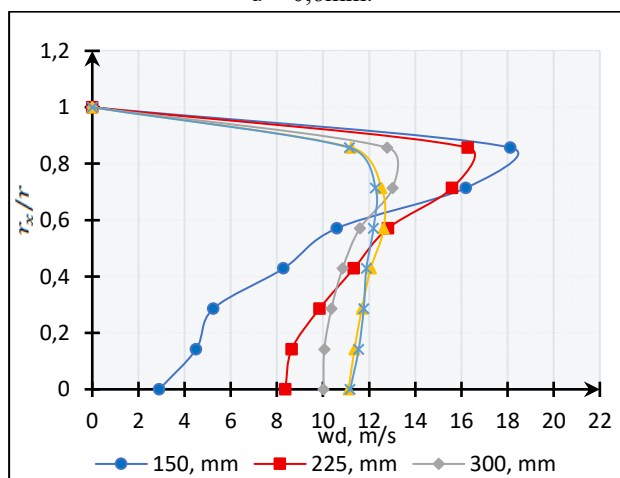
Приложение №16



Графика на изменение на компонента на вектора на скоростта $\vec{w}_d$ в равнината по оста x по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 45^\circ$ и дюза $d = 0,6$ mm.

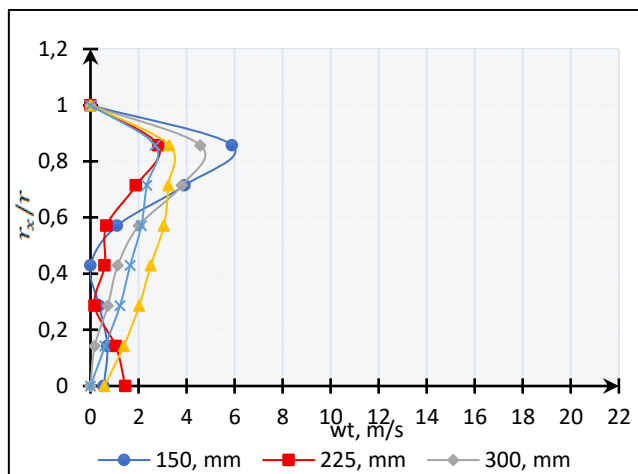


Графика на изменение на тангенциалната компонента на скоростта w_t , m/s по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 45^\circ$ и дюза $d = 0,6$ mm.

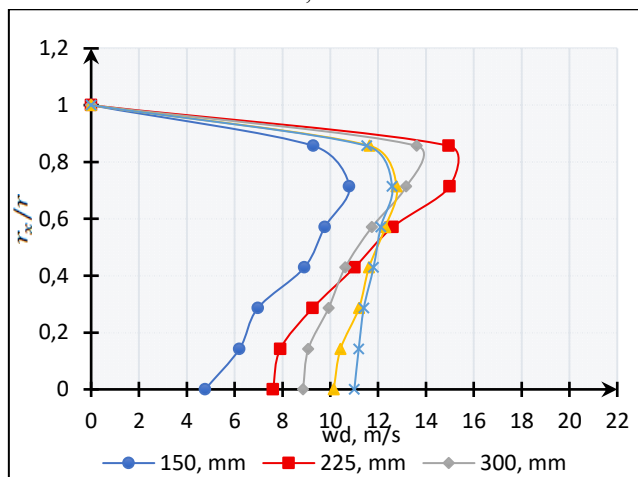


Графика на изменение на компонента на вектора на скоростта $\vec{w}_d$ в равнината по оста x по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 15^\circ$ и дюза $d = 0,8$ mm.

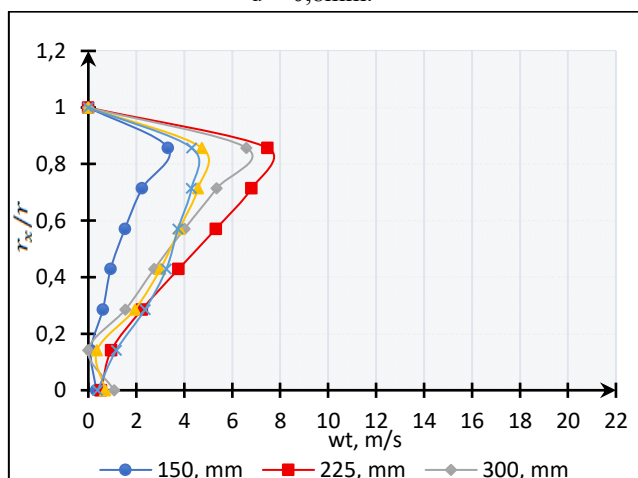
Приложение №17



Графика на изменение на тангенциалната компонента на скоростта w_t , m/s по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 15^\circ$ и дюза $d = 0,8$ mm.

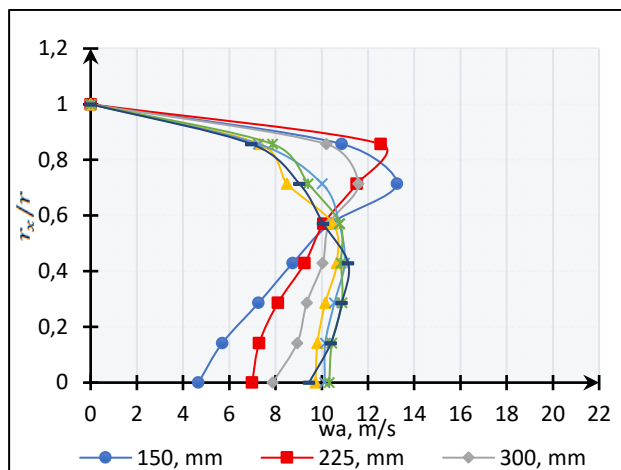


Графика на изменение на компонента на вектора на скоростта $\vec{w}_d$ в равнината по оста x по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 30^\circ$ и дюза $d = 0,8$ mm.

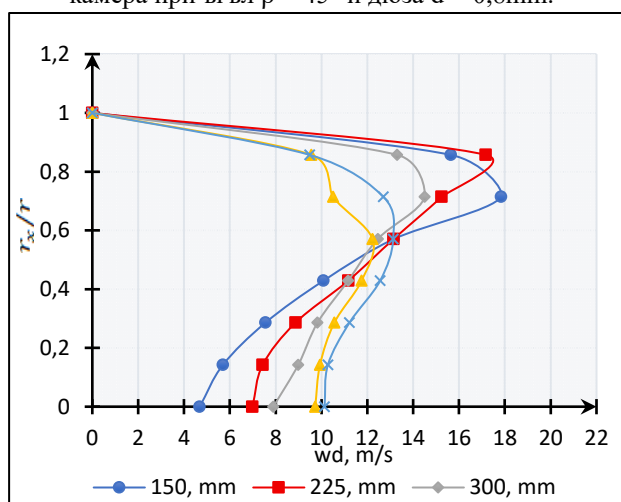


Графика на изменение на тангенциалната компонента на скоростта w_t , m/s по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 30^\circ$ и дюза $d = 0,8$ mm.

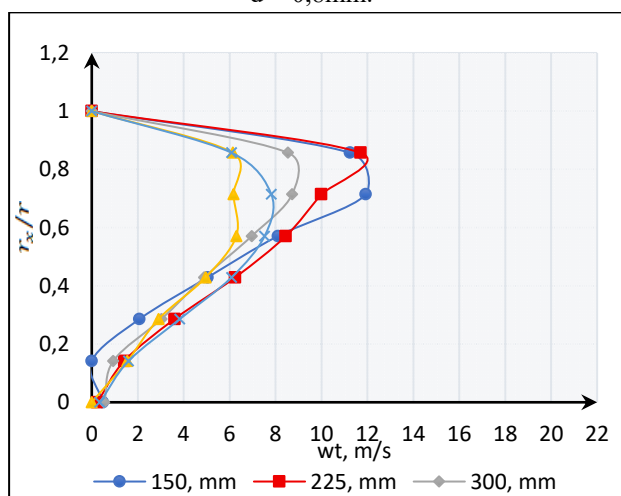
Приложение №18



Графика на изменение на аксиалната компонента на скоростта w_a , m/s по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 45^\circ$ и дюза $d = 0,8$ mm.

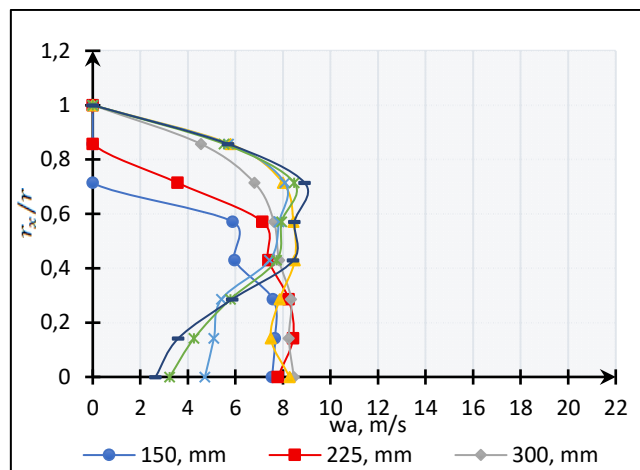


Графика на изменение на компонента на вектора на скоростта $\vec{w}_d$ в равнината по оста x по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 45^\circ$ и дюза $d = 0,8$ mm.

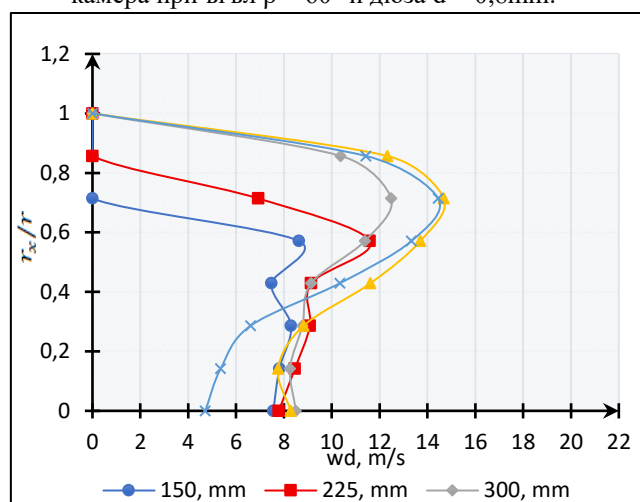


Графика на изменение на тангенциалната компонента на скоростта w_t , m/s по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 45^\circ$ и дюза $d = 0,8$ mm.

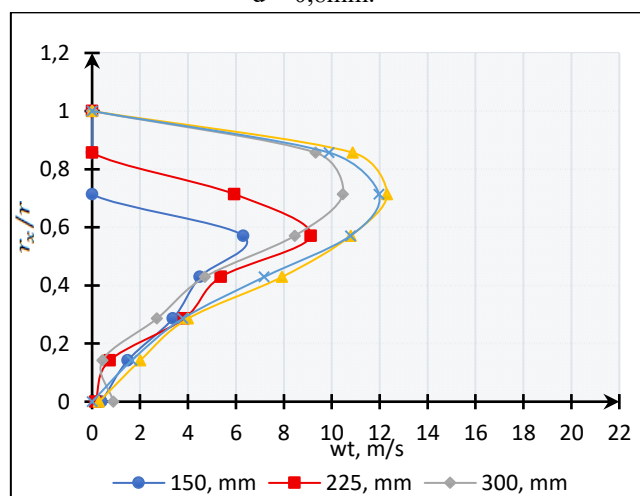
Приложение №19



Графика на изменение на аксиалната компонента на скоростта w_a , m/s по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 60^\circ$ и дюза $d = 0,8$ mm.

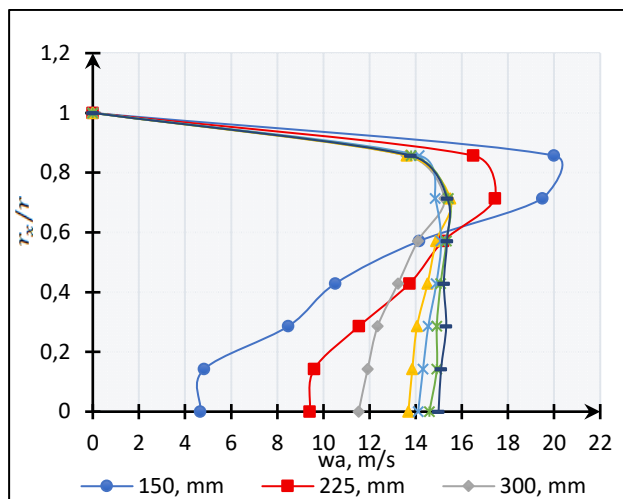


Графика на изменение на компонента на вектора на скоростта $\vec{w}_d$ в равнината по оста x по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 60^\circ$ и дюза $d = 0,8$ mm.

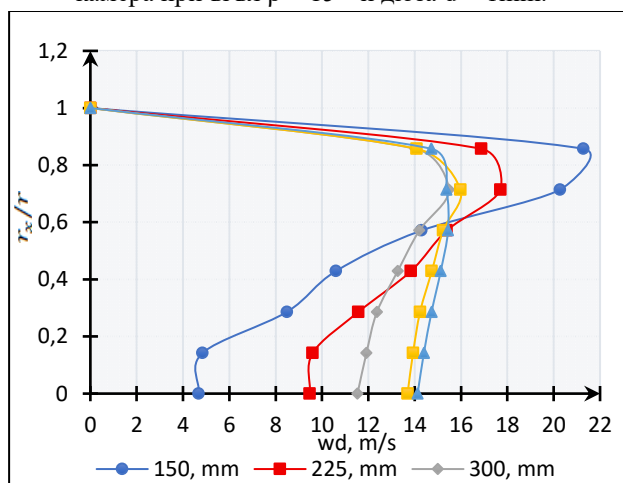


Графика на изменение на тангенциалната компонента на скоростта w_t , m/s по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 60^\circ$ и дюза $d = 0,8$ mm.

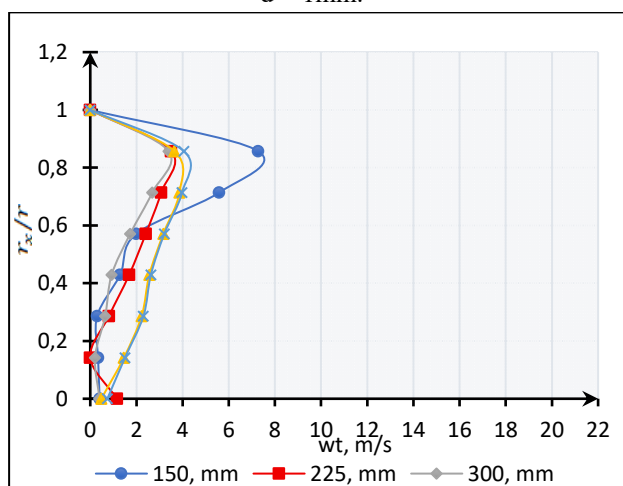
Приложение №20



Графика на изменение на аксиалната компонента на скоростта w_a , m/s по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 15^\circ$ и дюза $d = 1$ mm.

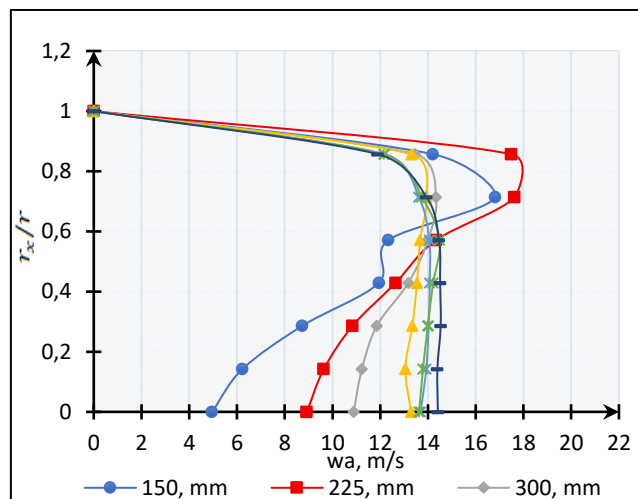


Графика на изменение на компонента на вектора на скоростта $\vec{w}_d$ в равнината по оста x по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 15^\circ$ и дюза $d = 1$ mm.

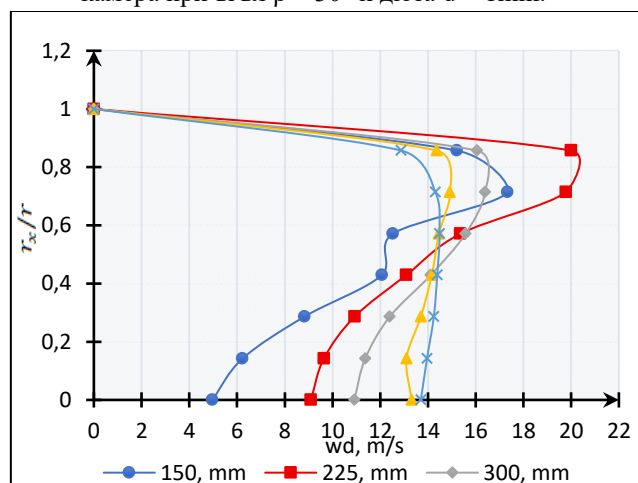


Графика на изменение на тангенциалната компонента на скоростта w_t , m/s по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 15^\circ$ и дюза $d = 1$ mm.

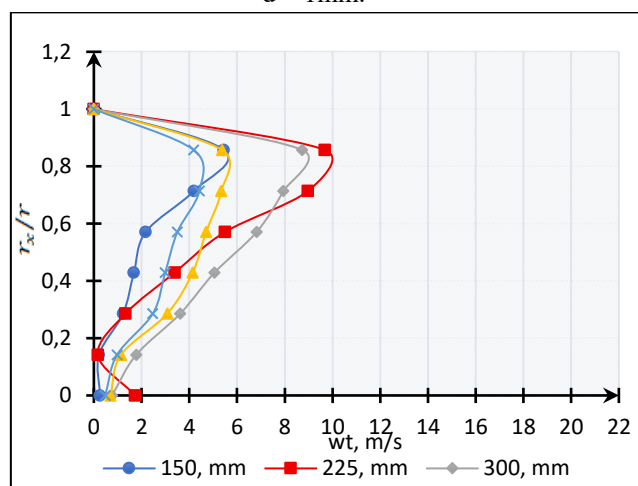
Приложение №21



Графика на изменение на аксиалната компонента на скоростта w_a , m/s по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 30^\circ$ и дюза $d = 1$ mm.

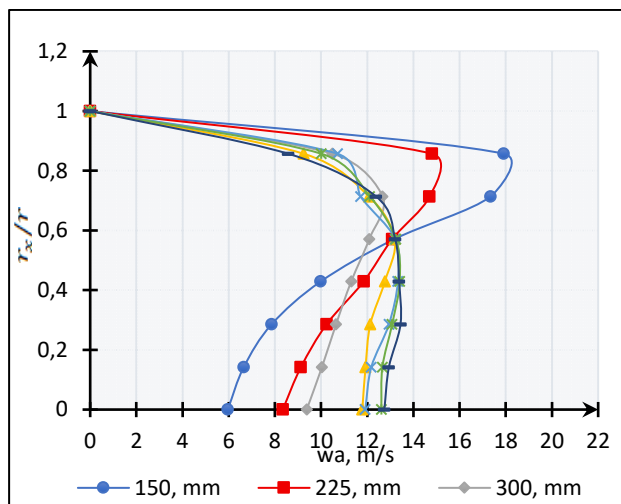


Графика на изменение на компонента на вектора на скоростта $\vec{w}_d$ в равнината по оста x по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 30^\circ$ и дюза $d = 1$ mm.

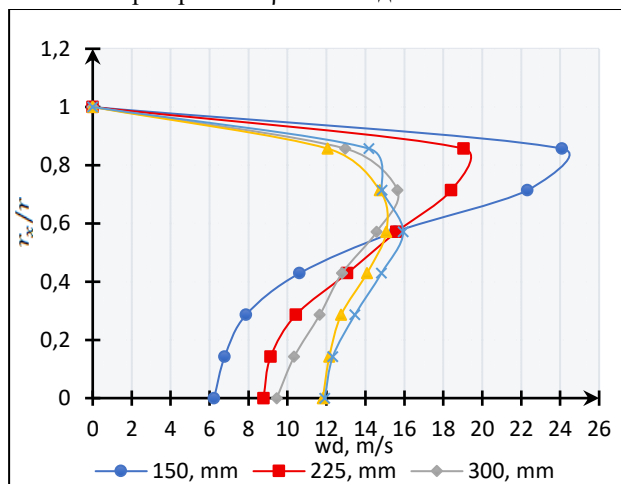


Графика на изменение на тангенциалната компонента на скоростта w_t , m/s по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 30^\circ$ и дюза $d = 1$ mm.

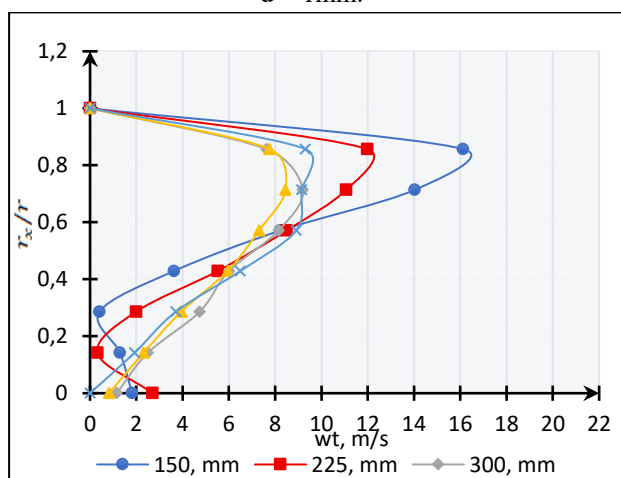
Приложение №22



Графика на изменение на аксиалната компонента на скоростта w_a , m/s по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 45^\circ$ и дюза $d = 1$ mm.

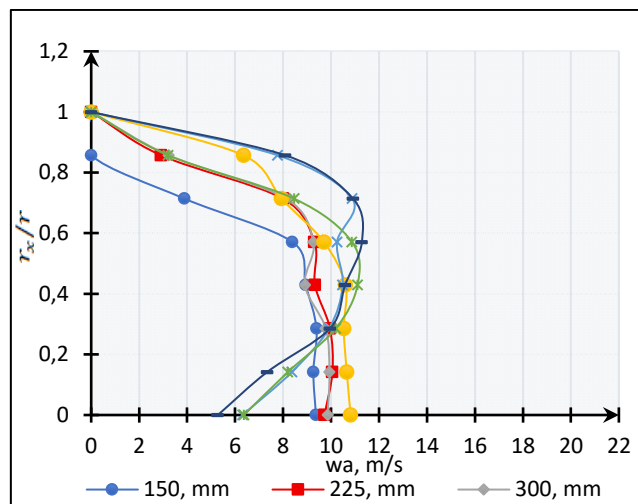


Графика на изменение на компонента на вектора на скоростта $\vec{w}_d$ в равнината по оста x по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 45^\circ$ и дюза $d = 1$ mm.

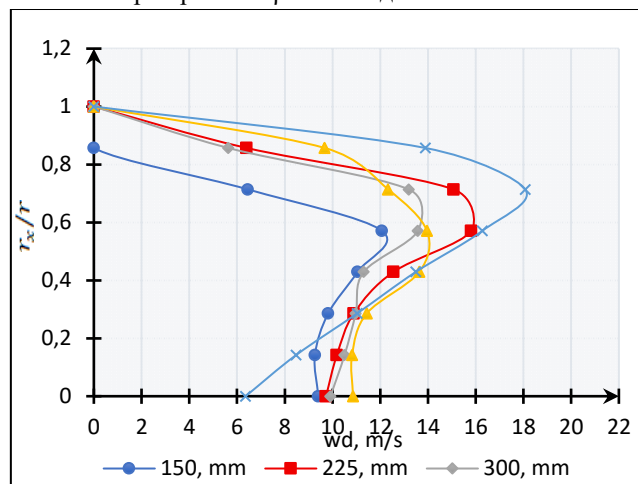


Графика на изменение на тангенциалната компонента на скоростта w_t , m/s по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 45^\circ$ и дюза $d = 1$ mm.

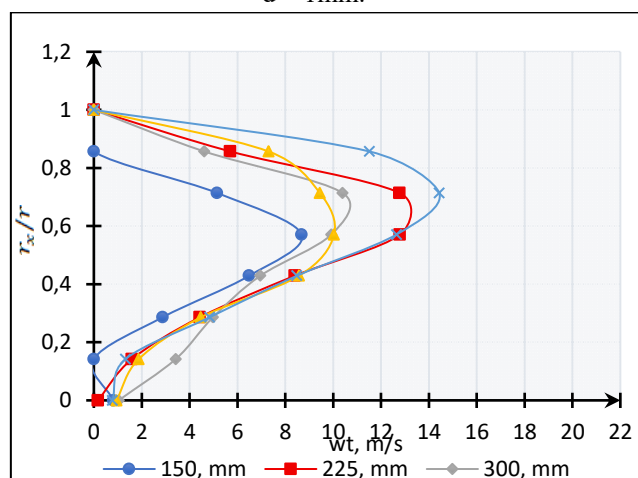
Приложение №23



Графика на изменение на аксиалната компонента на скоростта w_a , m/s по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 60^\circ$ и дюза $d = 1$ mm.

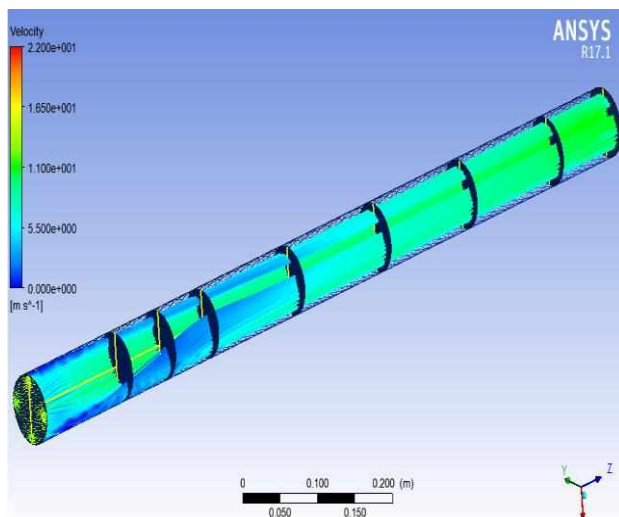


Графика на изменение на компонента на вектора на скоростта $\vec{w}_d$ в равнината по оста x по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 60^\circ$ и дюза $d = 1$ mm.

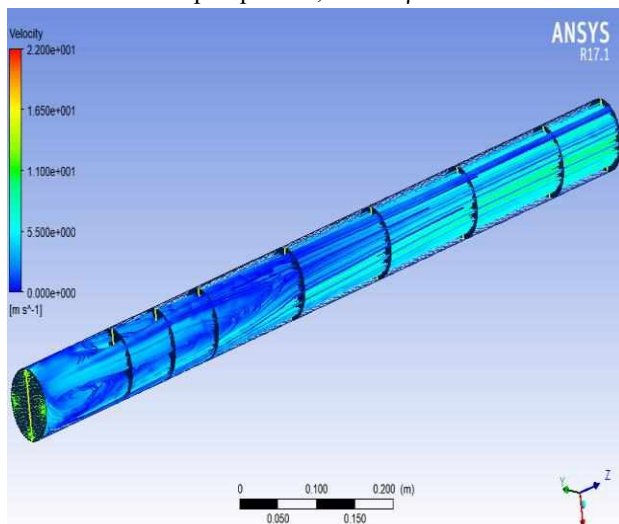


Графика на изменение на тангенциалната компонента на скоростта w_t , m/s по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 60^\circ$ и дюза $d = 1$ mm.

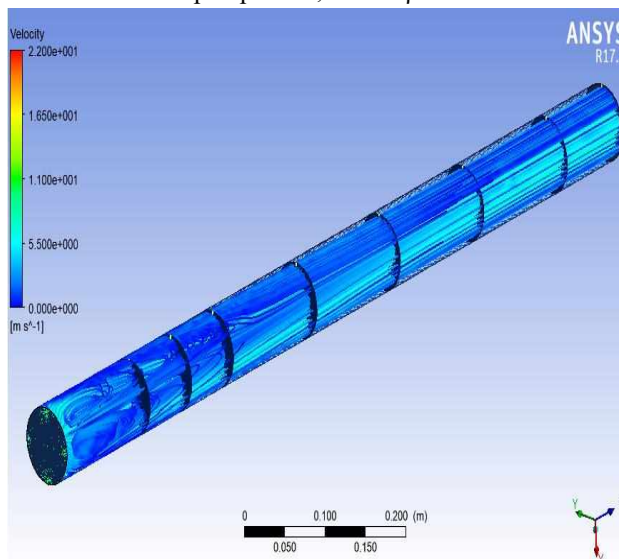
Приложение №24



Разпределение на токовете линии в смесителната камера при $d=0,6\text{mm}$ и $\beta=30^\circ$.

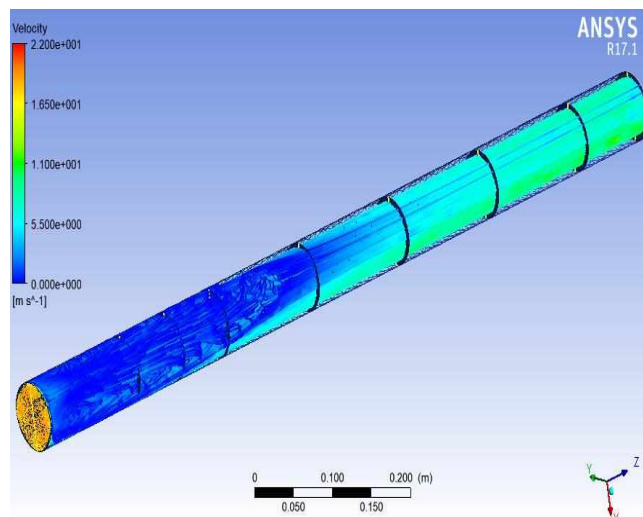


Разпределение на токовете линии в смесителната камера при $d=0,6\text{mm}$ и $\beta=45^\circ$.

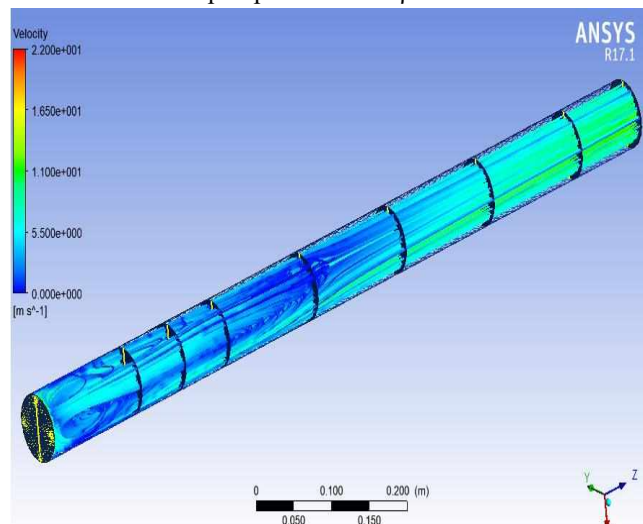


Разпределение на токовете линии в смесителната камера при $d=0,6\text{mm}$ и $\beta=60^\circ$.

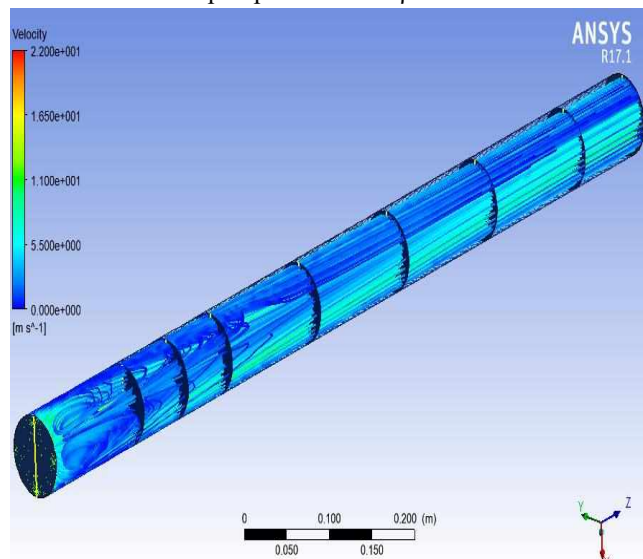
Приложение №25



Разпределение на токовете линии в смесителната камера при $d=1\text{mm}$ и $\beta=30^\circ$.

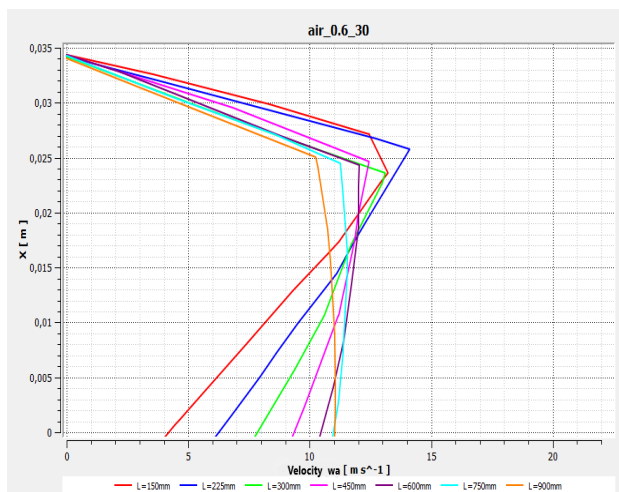


Разпределение на токовете линии в смесителната камера при $d=1\text{mm}$ и $\beta=45^\circ$.

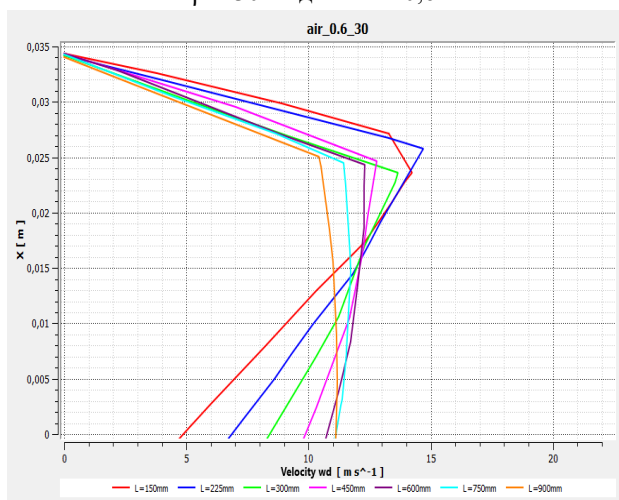


Разпределение на токовете линии в смесителната камера при $d=1\text{mm}$ и $\beta=60^\circ$.

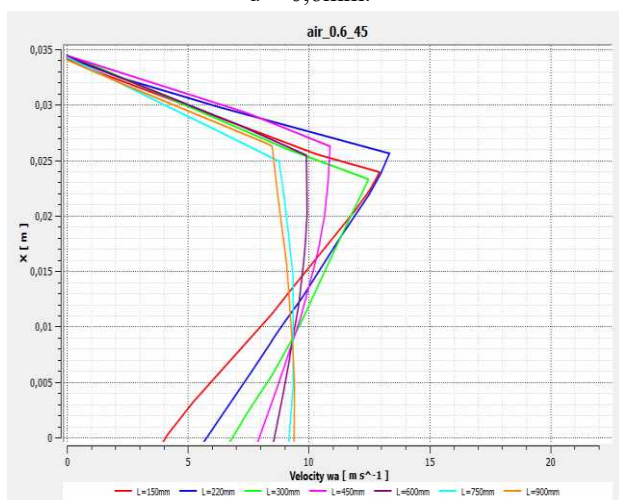
Приложение №26



Графика на изменение на аксиалната скорост w_a , m/s по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 30^\circ$ и дюза $d = 0,6\text{mm}$.

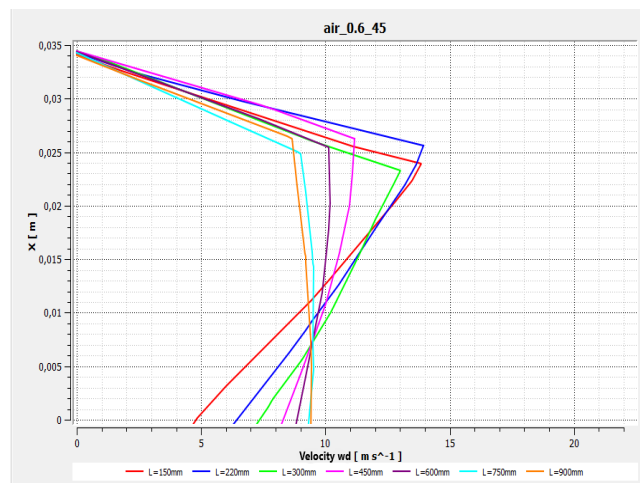


Графика на изменение на компонента на вектора на скоростта $\vec{w}_d$ в равнината по оста x по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 30^\circ$ и дюза $d = 0,6\text{mm}$.

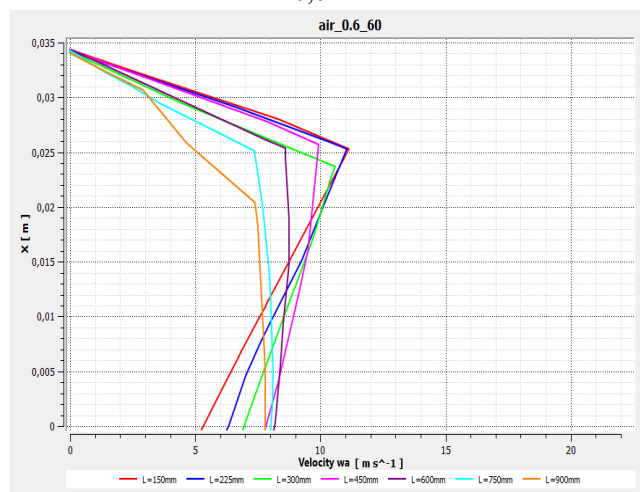


Графика на изменение на аксиалната скорост w_a , m/s по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 45^\circ$ и дюза $d = 0,6\text{mm}$.

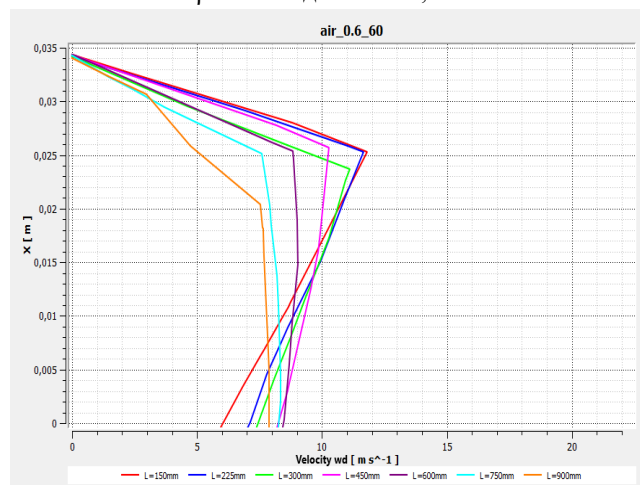
Приложение №27



Графика на изменение на компонента на вектора на скоростта $\vec{w}_d$ в равнината по оста x по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 45^\circ$ и дюза $d = 0,6\text{mm}$.

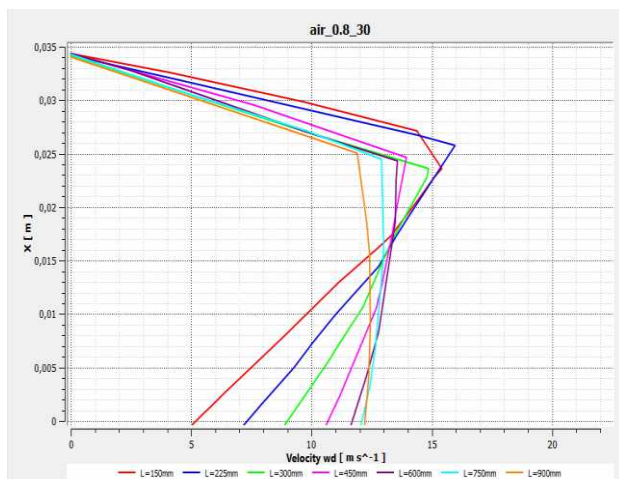


Графика на изменение на аксиалната скорост w_a , m/s по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 60^\circ$ и дюза $d = 0,6\text{mm}$.

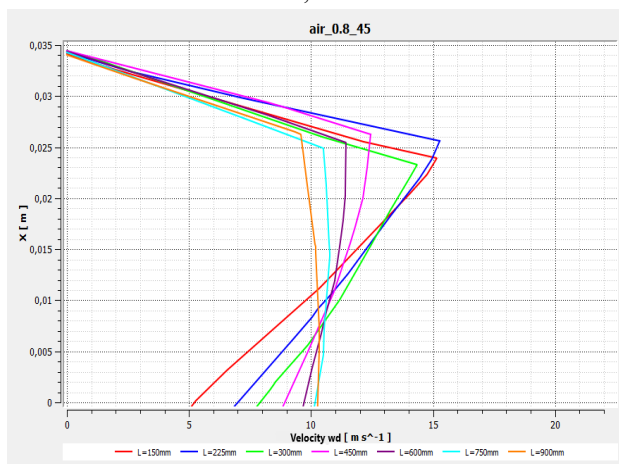


Графика на изменение на компонента на вектора на скоростта $\vec{w}_d$ в равнината по оста x по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 60^\circ$ и дюза $d = 0,6\text{mm}$.

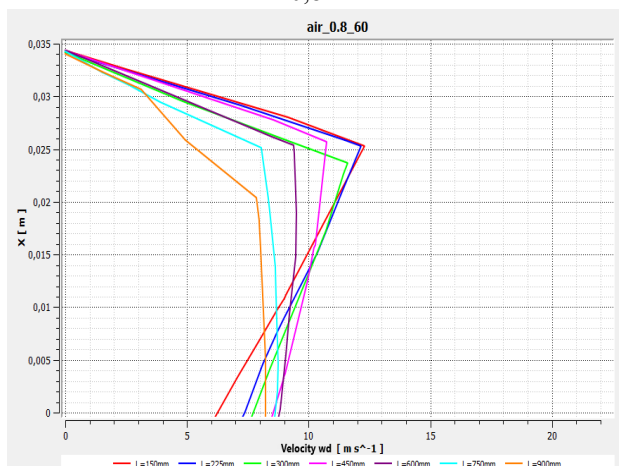
Приложение №28



Графика на изменение на компонента на вектора скоростта $\vec{w}_d$ в равнината по оста x по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 30^\circ$ и дюза $d = 0,8\text{mm}$.

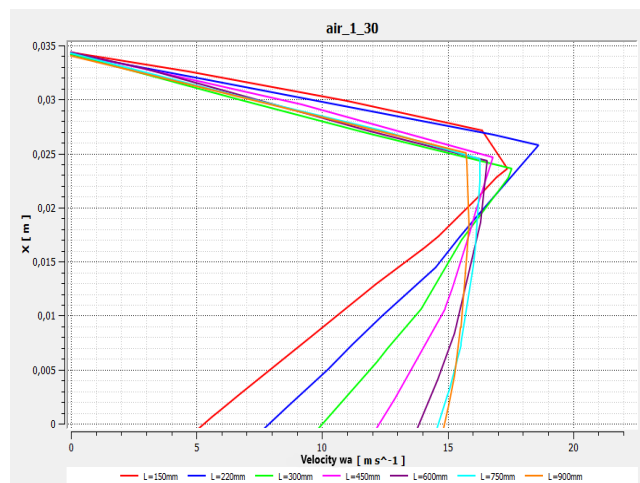


Графика на изменение на компонента на вектора на скоростта $\vec{w}_d$ в равнината по оста x по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 45^\circ$ и дюза $d = 0,8\text{mm}$.

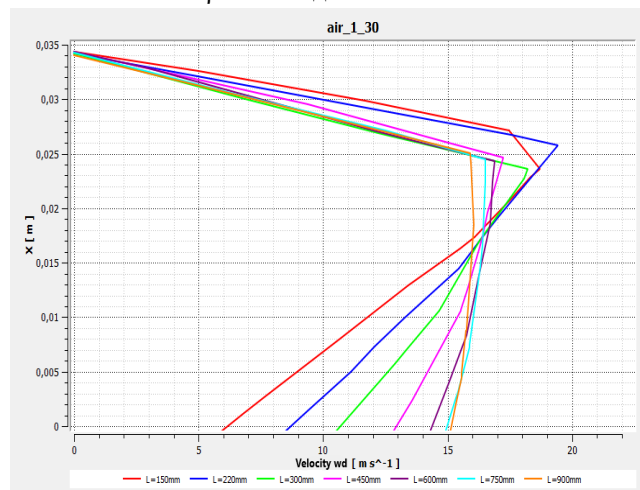


Графика на изменение на компонента на вектора на скоростта $\vec{w}_d$ в равнината по оста x по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 60^\circ$ и дюза $d = 0,8\text{mm}$.

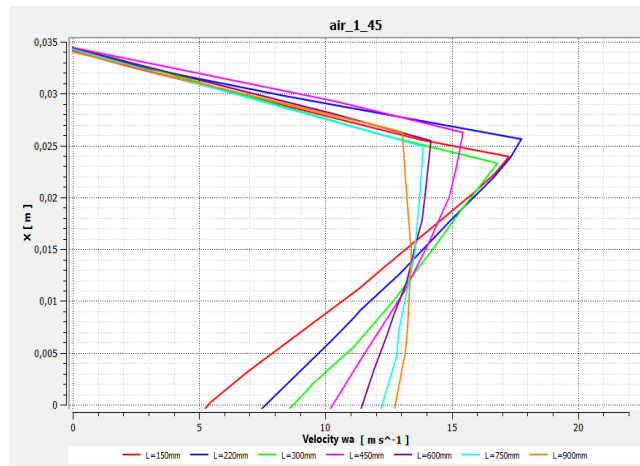
Приложение №29



Графика на изменение на аксиалната скорост w_a , m/s по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 30^\circ$ и дюза $d = 1\text{mm}$.

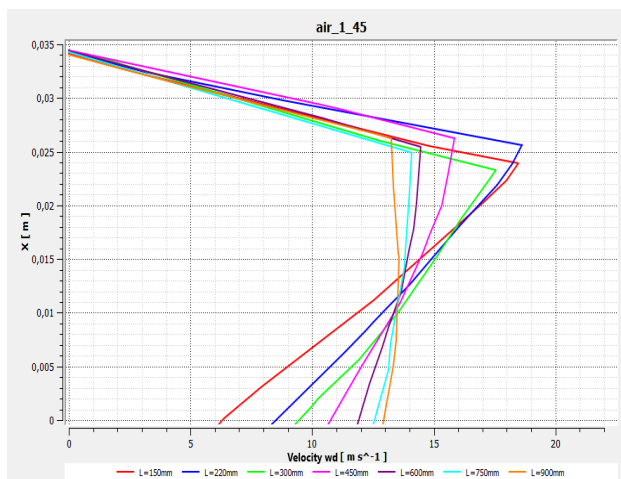


Графика на изменение на компонента на вектора на скоростта $\vec{w}_d$ в равнината по оста x по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 30^\circ$ и дюза $d = 1\text{mm}$.

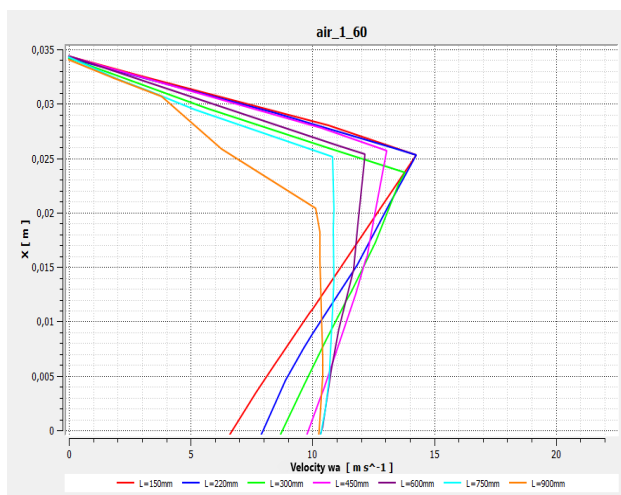


Графика на изменение на аксиалната скорост w_a , m/s по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 45^\circ$ и дюза $d = 1\text{mm}$.

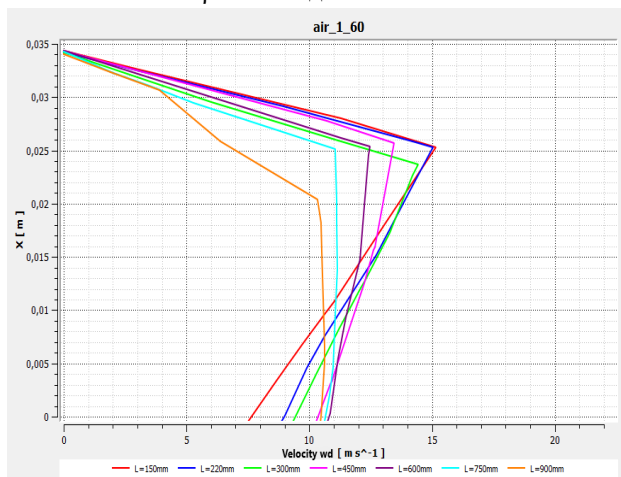
Приложение №30



Графика на изменение на компонента на вектора на скоростта $\vec{w}_d$ в равнината по оста x по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 45^\circ$ и дюза $d = 1$ мм.

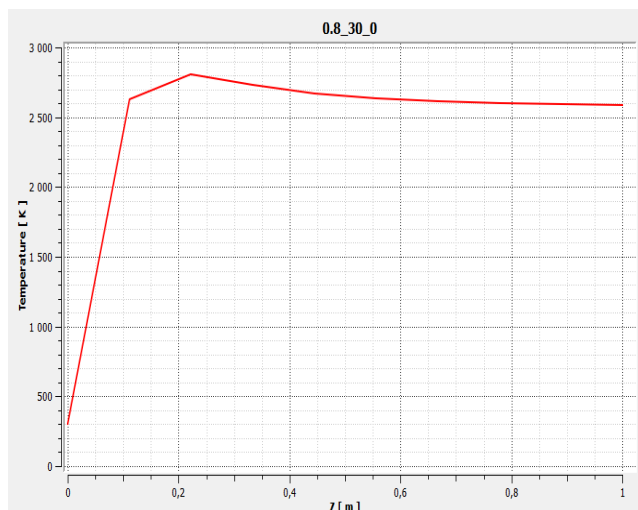


Графика на изменение на аксиалната скорост w_a , m/s по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 60^\circ$ и дюза $d = 1$ мм.

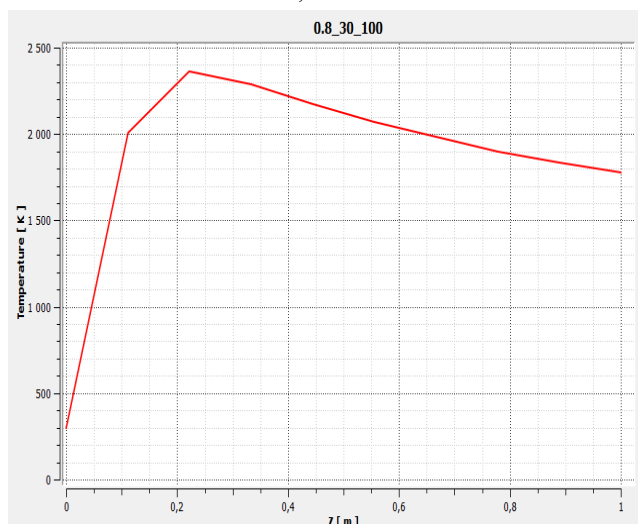


Графика на изменение на компонента на вектора на скоростта $\vec{w}_d$ в равнината по оста x по дължина на смесителната камера при ъгъл $\beta = 60^\circ$ и дюза $d = 1$ мм.

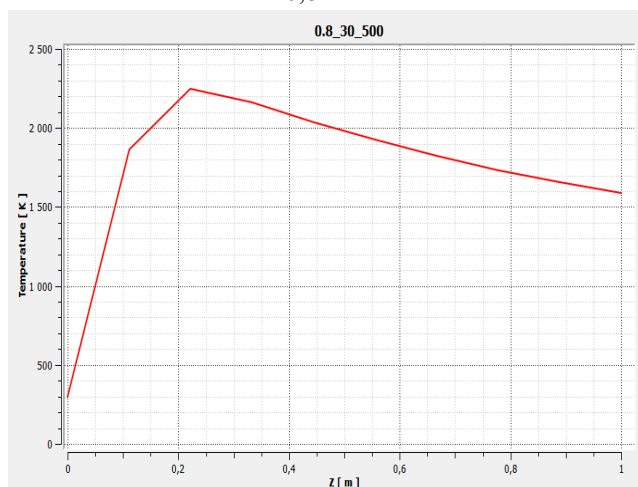
Приложение №31



Изменение на температурата по оста на смесителната камера при $h=0$ W/m² K, $\beta=30^\circ$ и $d=0,8$ мм.

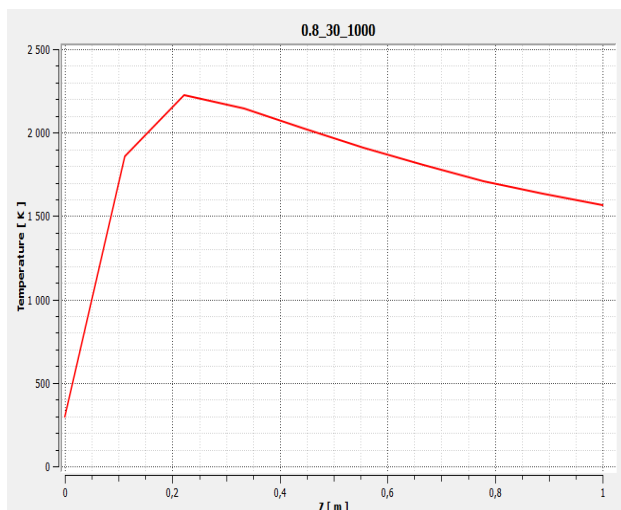


Изменение на температурата по оста на смесителната камера при $h=100$ W/m² K, $\beta=30^\circ$ и $d=0,8$ мм.

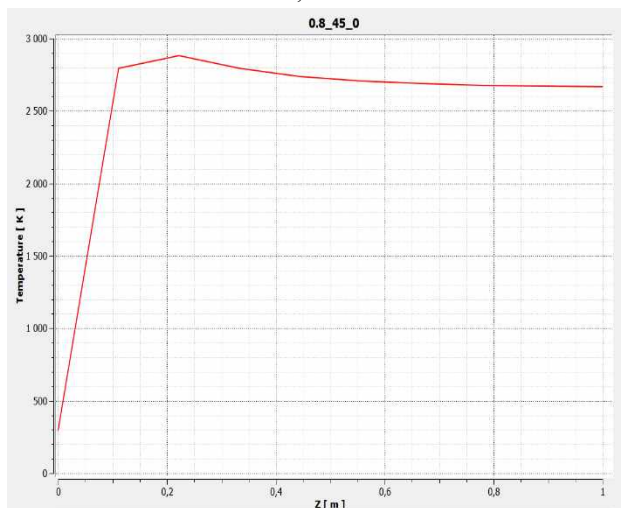


Изменение на температурата по оста на смесителната камера при $h=500$ W/m² K, $\beta=30^\circ$ и $d=0,8$ мм.

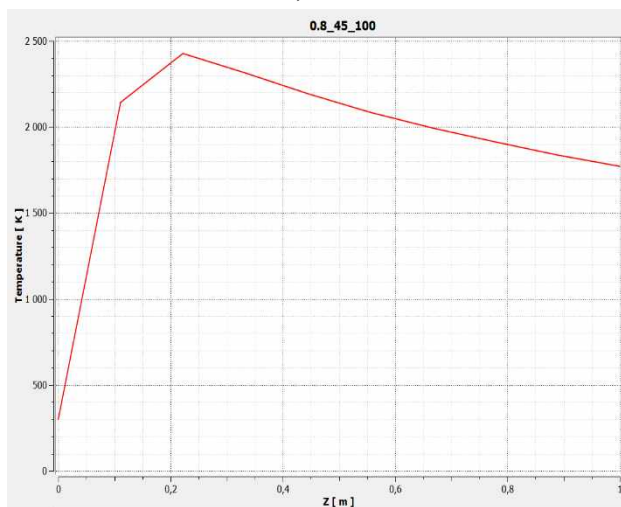
Приложение №32



Изменение на температурата по оста на смесителната камера при $h=1000\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=30^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

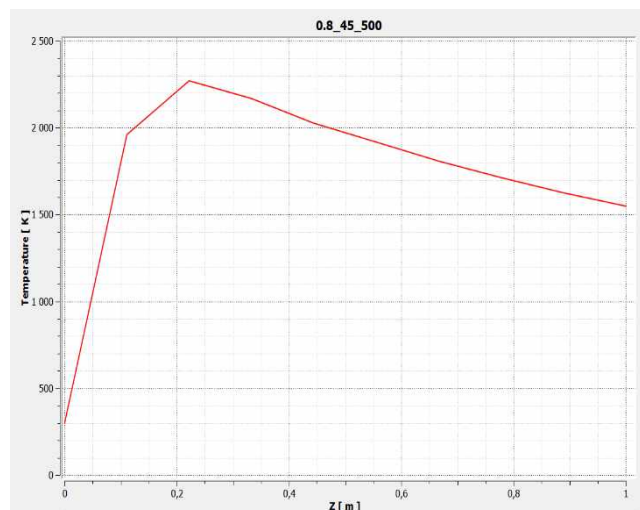


Изменение на температурата по оста на смесителната камера при $h=0\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=45^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

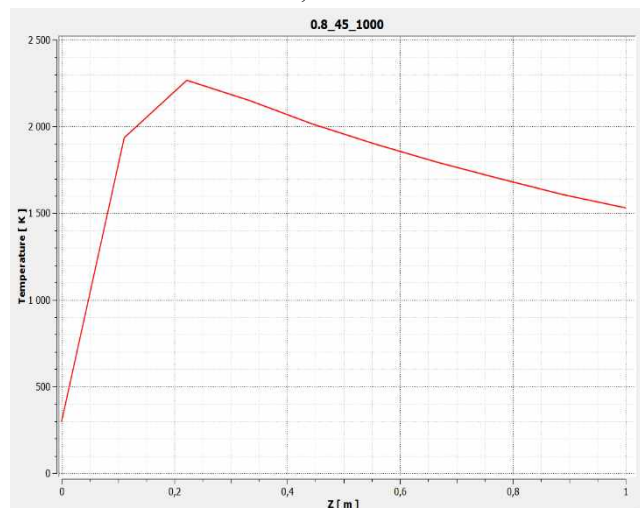


Изменение на температурата по оста на смесителната камера при $h=100\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=45^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

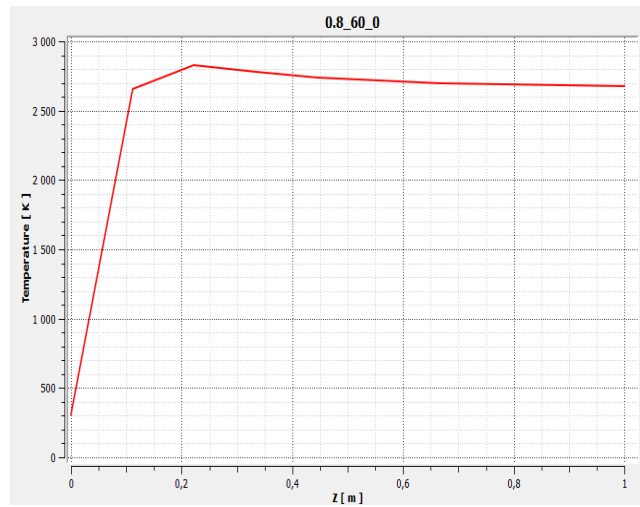
Приложение №33



Изменение на температурата по оста на смесителната камера при $h=500\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=45^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

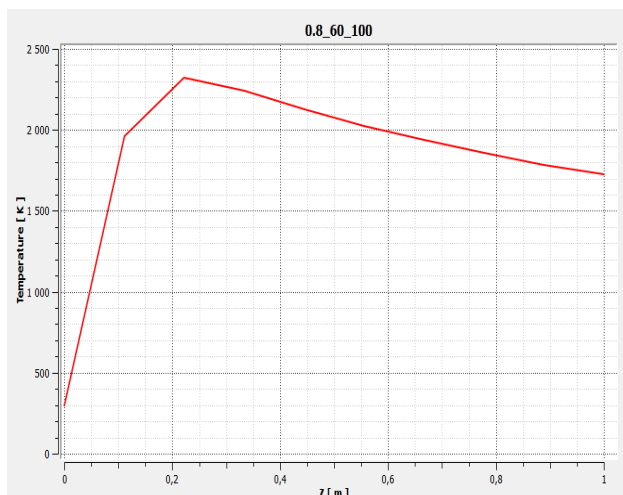


Изменение на температурата по оста на смесителната камера при $h=1000\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=45^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

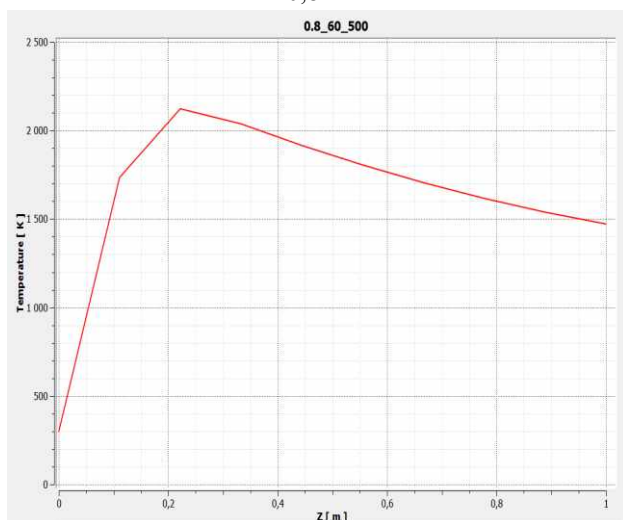


Изменение на температурата по оста на смесителната камера при $h=0\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=60^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

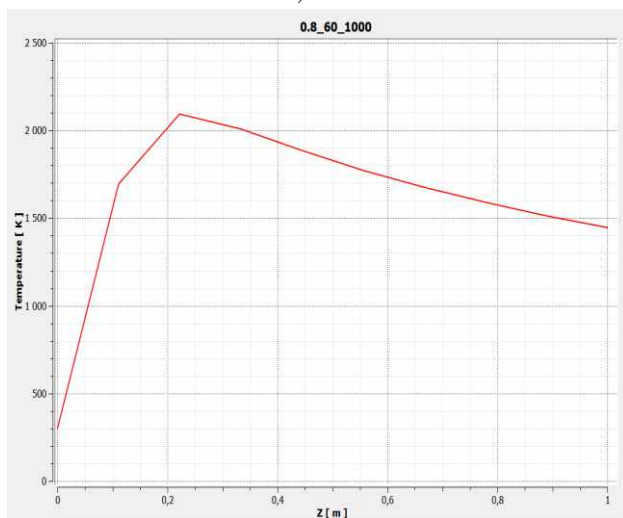
Приложение №34



Изменение на температурата по оста на смесителната камера при $h=100\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=60^\circ$ и $d=0.8\text{mm}$

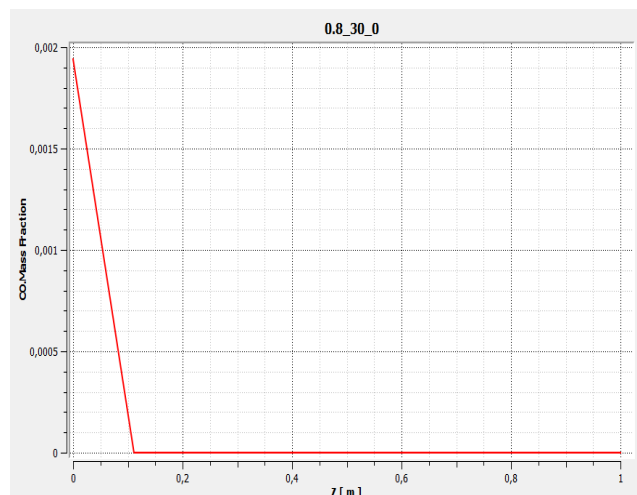


Изменение на температурата по оста на смесителната камера при $h=500\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=60^\circ$ и $d=0.8\text{mm}$.

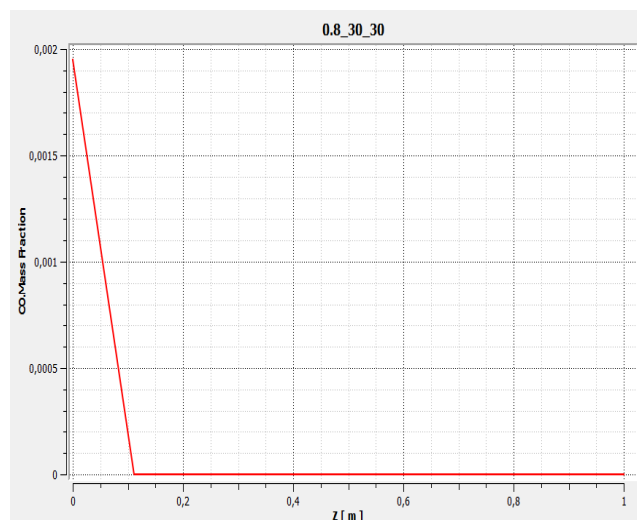


Изменение на температурата по оста на смесителната камера при $h=1000\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=60^\circ$ и $d=0.8\text{mm}$.

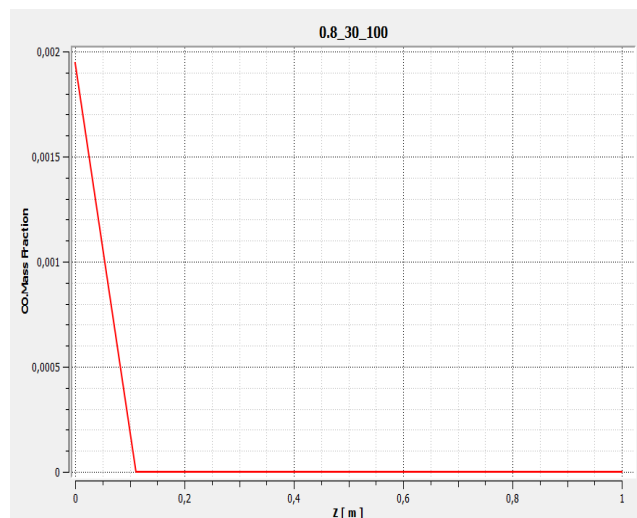
Приложение №35



Масова концентрация на CO при $h=0\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=30^\circ$ и $d=0.8\text{mm}$.

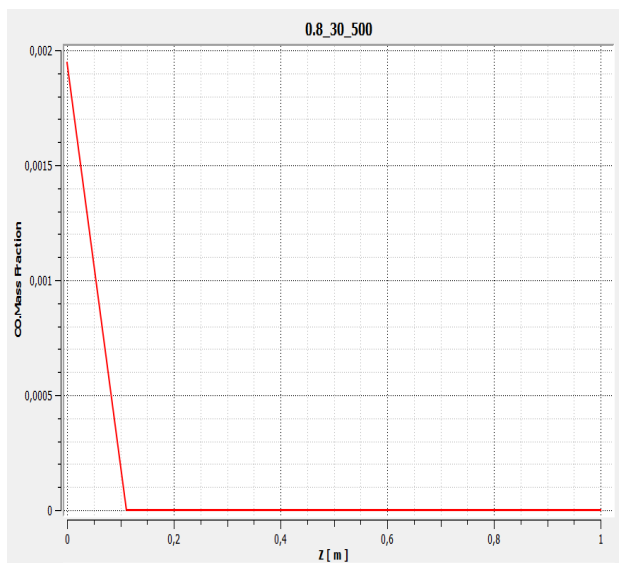


Масова концентрация на CO при $h=30\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=30^\circ$ и $d=0.8\text{mm}$.

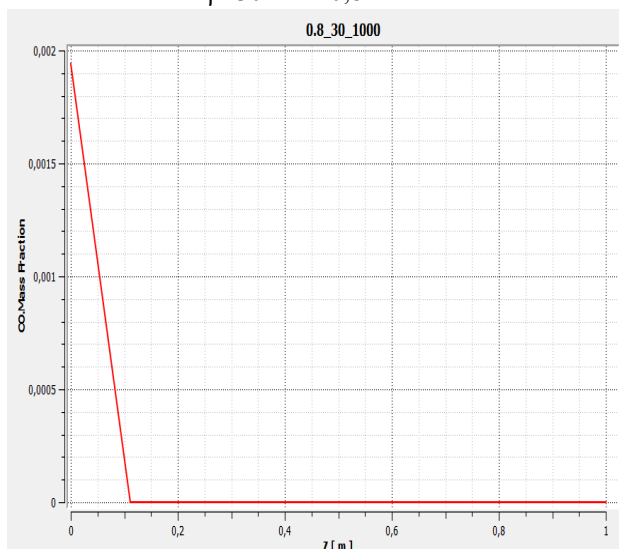


Масова концентрация на CO при $h=100\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=30^\circ$ и $d=0.8\text{mm}$.

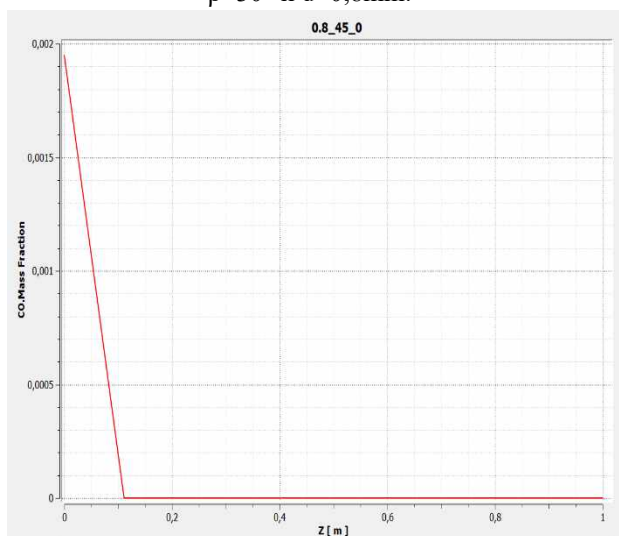
Приложение №36



Масова концентрация на CO при $h=500\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=30^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

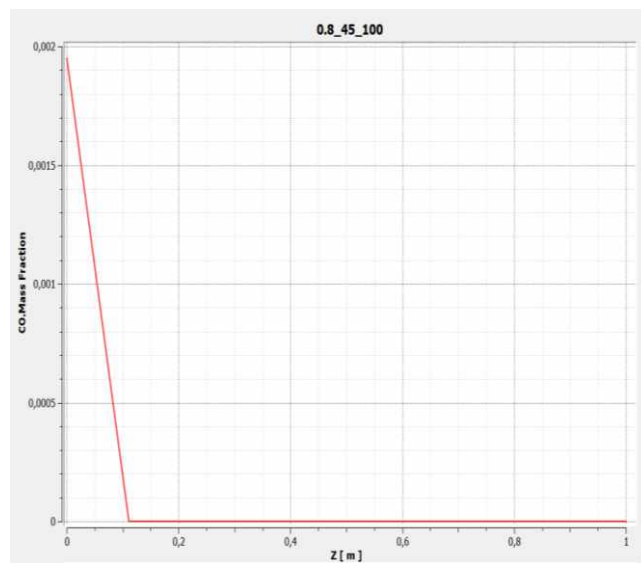


Масова концентрация на CO при $h=1000\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=30^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

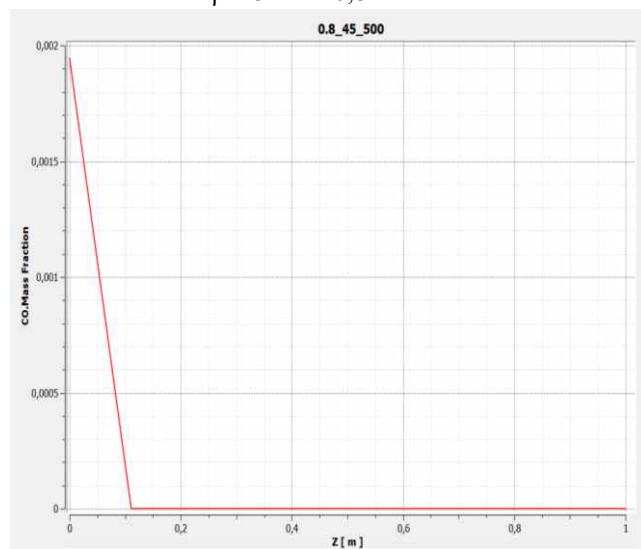


Масова концентрация на CO при $h=0\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=45^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

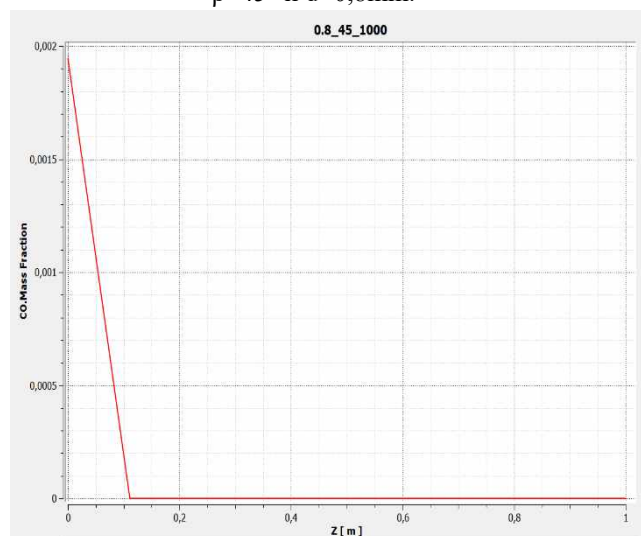
Приложение №37



Масова концентрация на CO при $h=100\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=45^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

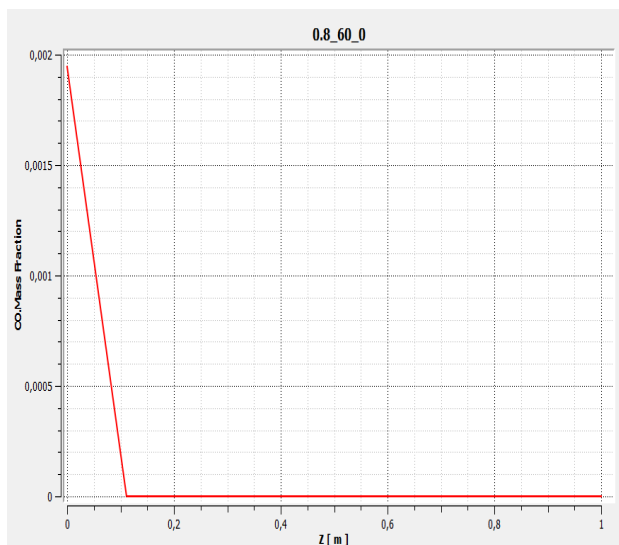


Масова концентрация на CO при $h=500\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=45^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

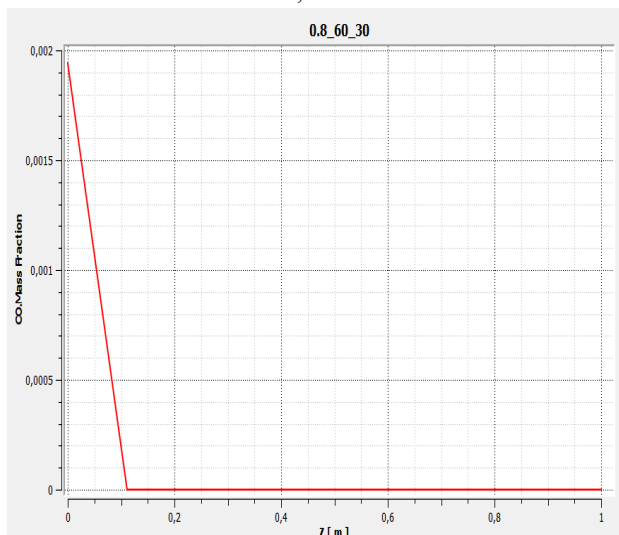


Масова концентрация на CO при $h=1000\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=45^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

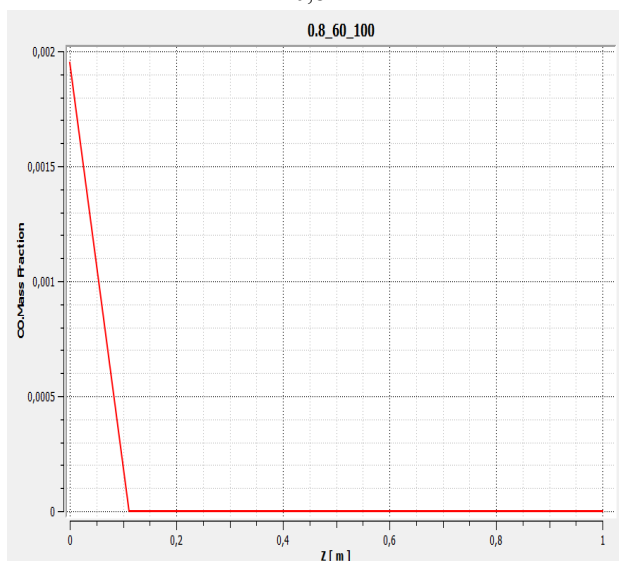
Приложение №38



Масова концентрация на CO при $h=0\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=60^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

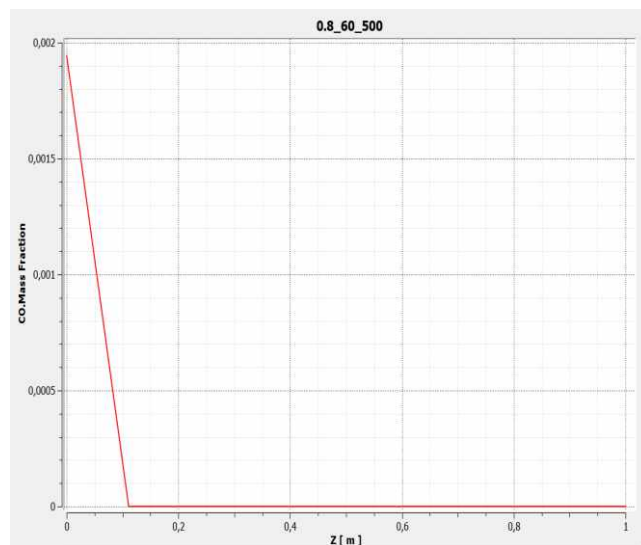


Масова концентрация на CO при $h=30\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=60^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

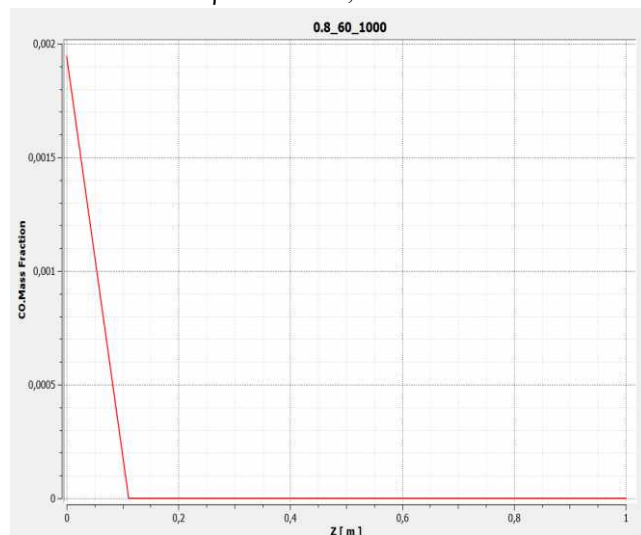


Масова концентрация на CO при $h=100\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=60^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

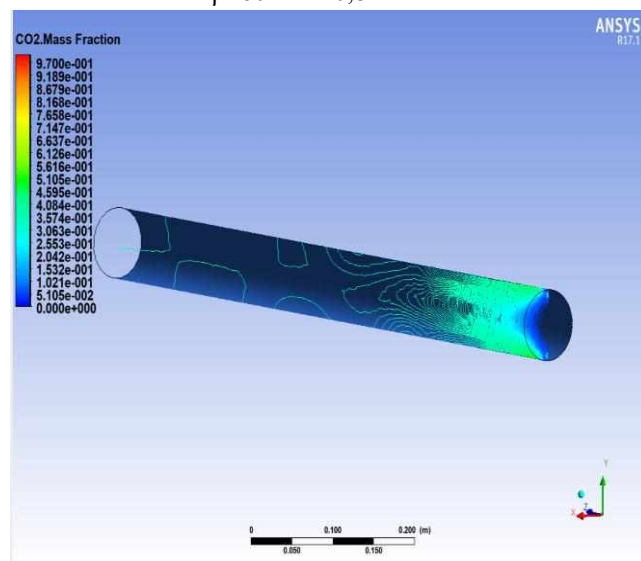
Приложение №39



Масова концентрация на CO при $h=500\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=60^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

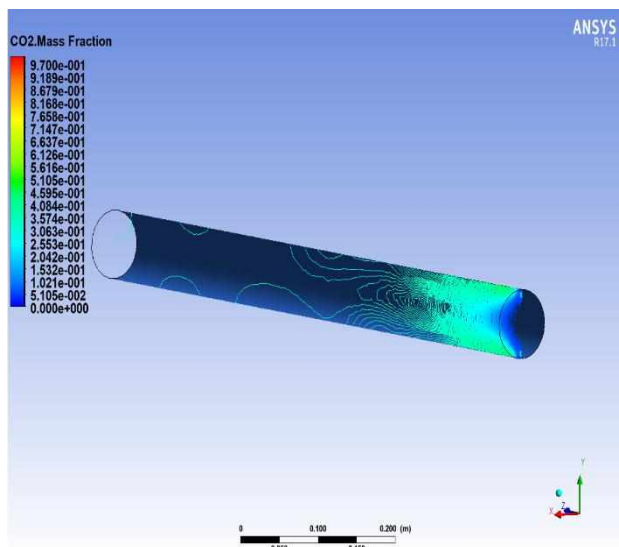


Масова концентрация на CO при $h=1000\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=60^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

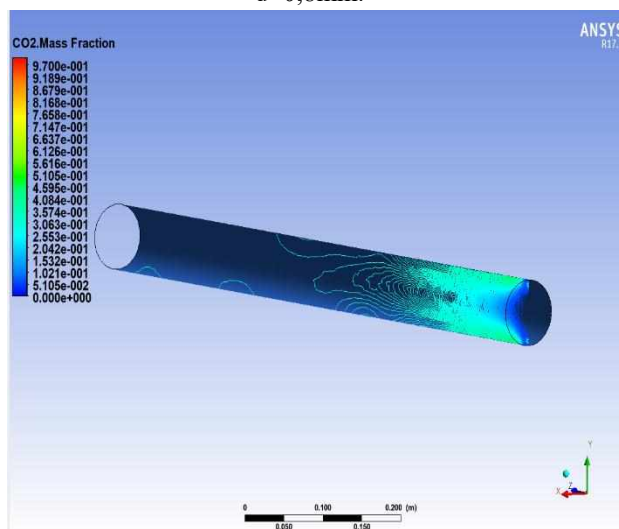


Концентрация на CO_2 при $h=0\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=30^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

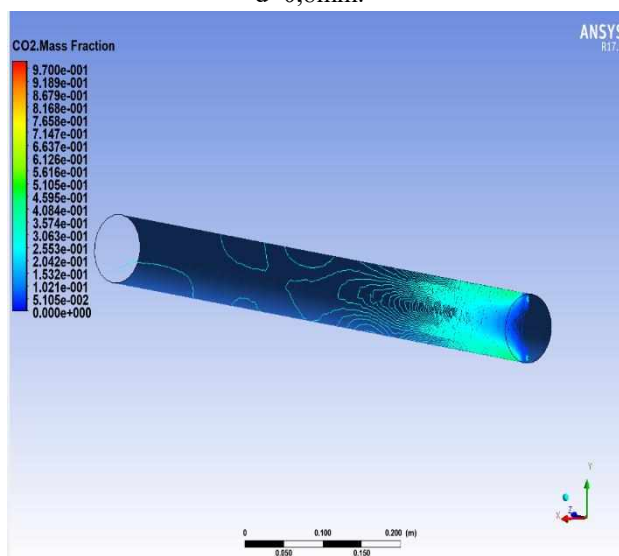
Приложение №40



Концентрация на CO_2 при $h=30\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=30^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

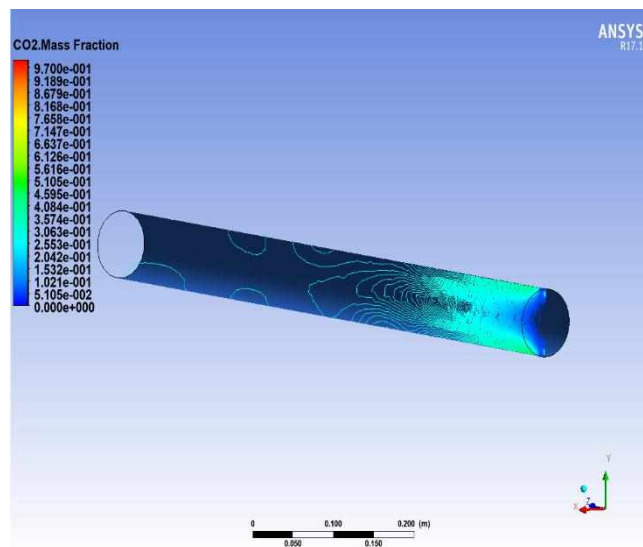


Концентрация на CO_2 при $h=100\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=30^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

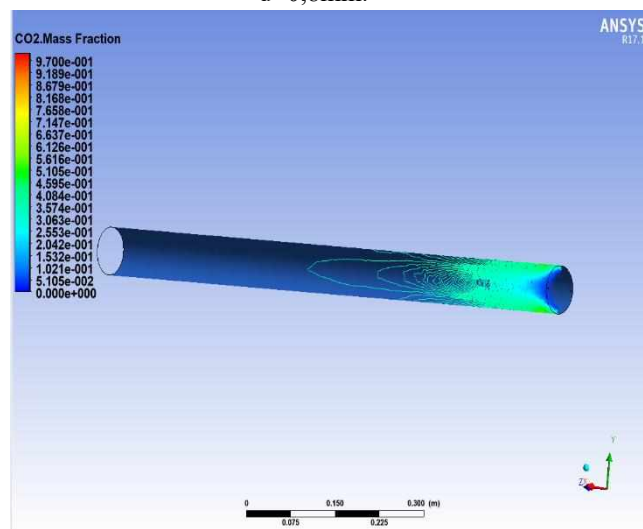


Концентрация на CO_2 при $h=500\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=30^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

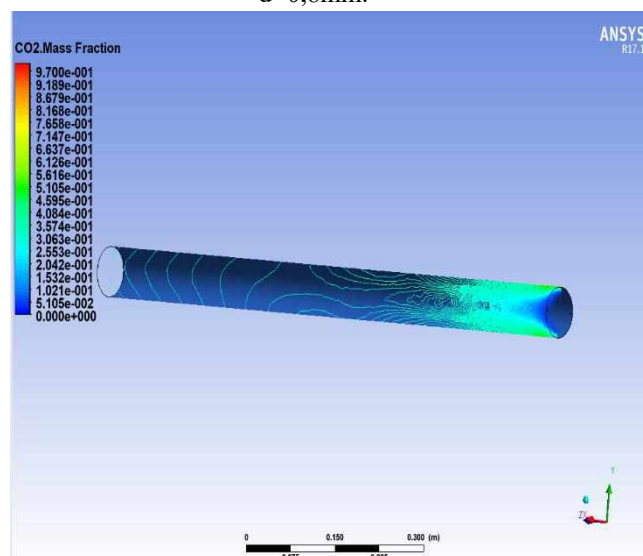
Приложение №41



Концентрация на CO_2 при $h=1000\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=30^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

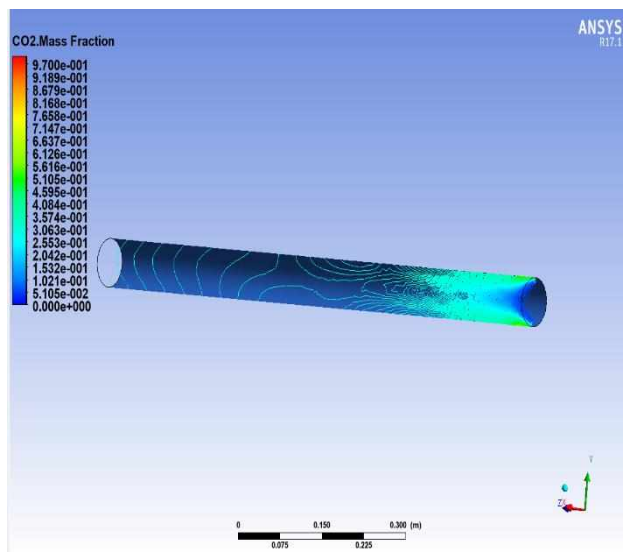


Концентрация на CO_2 при $h=0\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=60^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

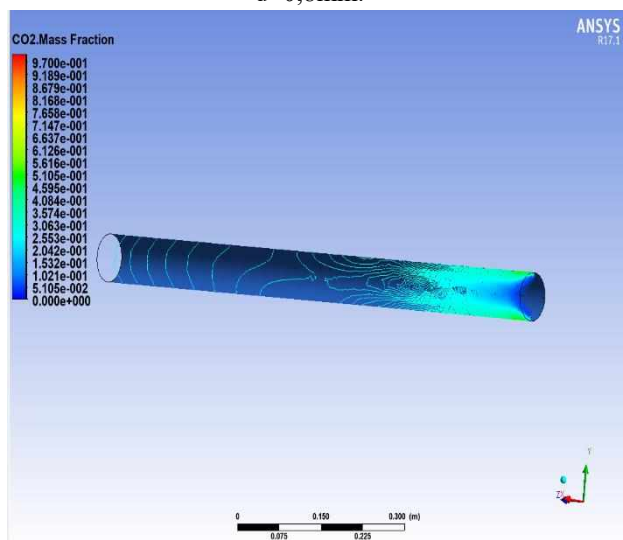


Концентрация на CO_2 при $h=30\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=60^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

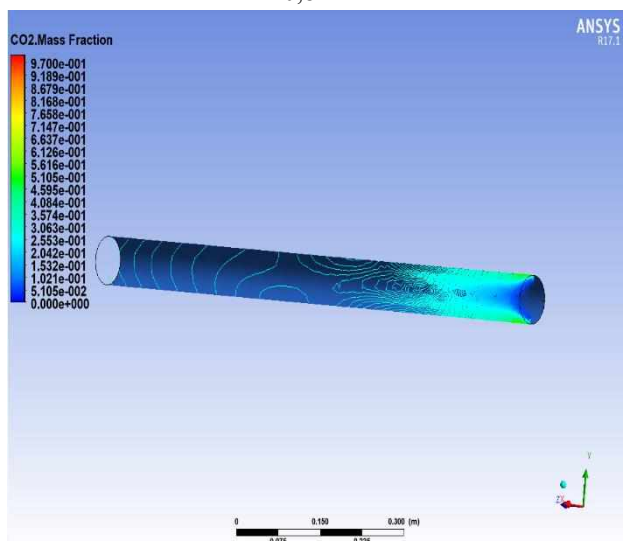
Приложение №42



Концентрация на CO₂ при $h=100\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=60^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

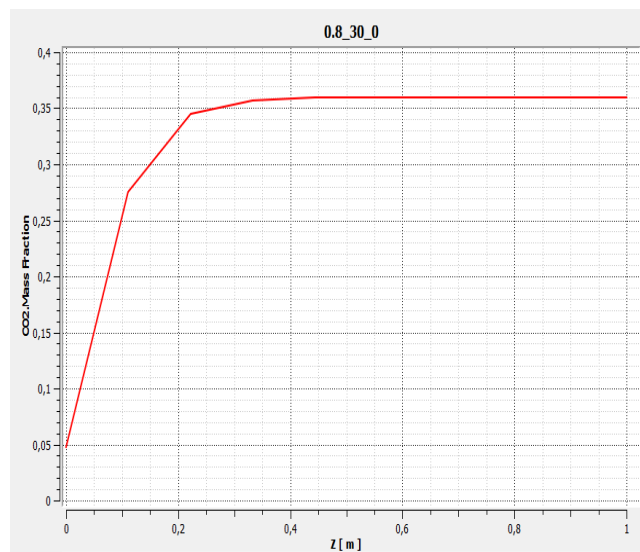


Концентрация на CO₂ при $h=500\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=60^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

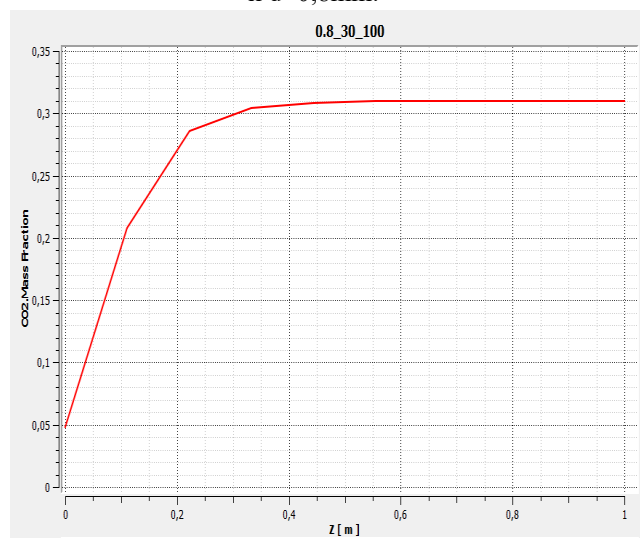


Концентрация на CO₂ при $h=1000\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=60^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

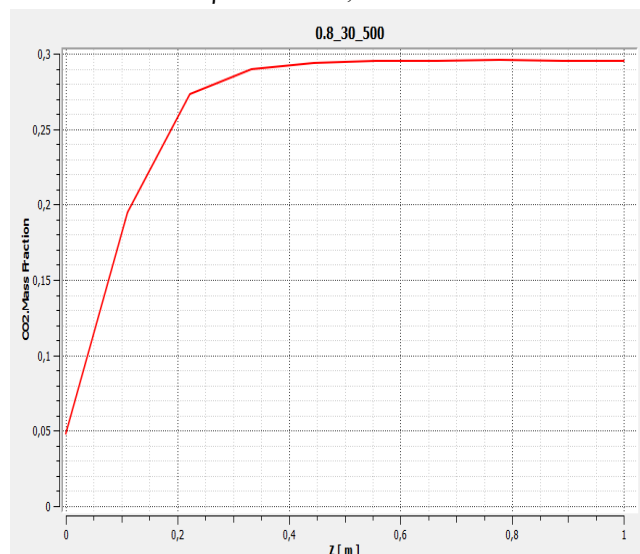
Приложение №43



Масова концентрация на CO₂ при $h=0\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=30^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

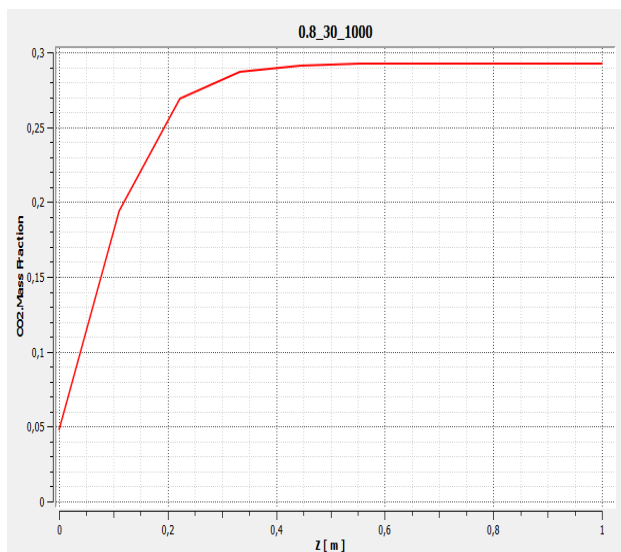


Масова концентрация на CO₂ при $h=100\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=30^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

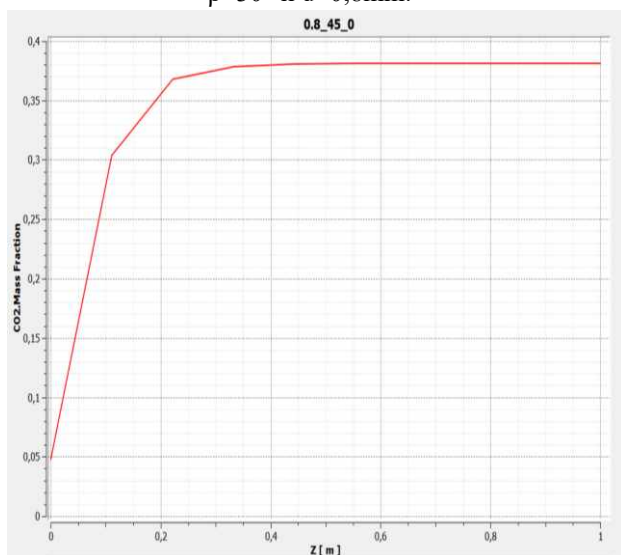


Масова концентрация на CO₂ при $h=500\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=30^\circ$ и $d=0,8\text{mm}$.

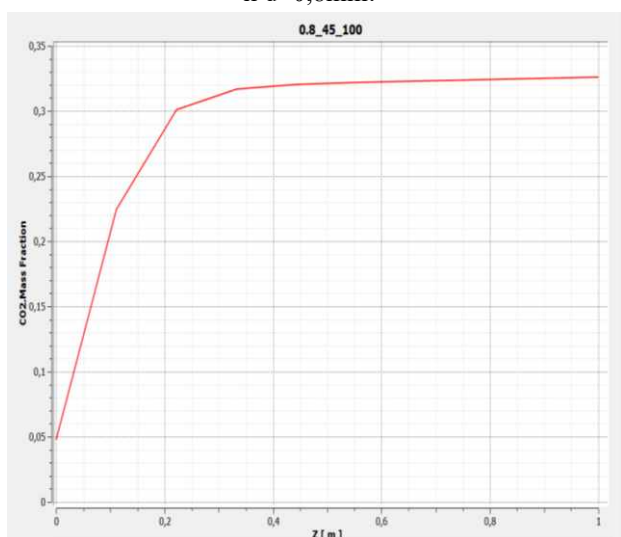
Приложение №44



Масова концентрация на CO₂ при $h=1000\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=30^\circ$ и $d=0.8\text{mm}$.

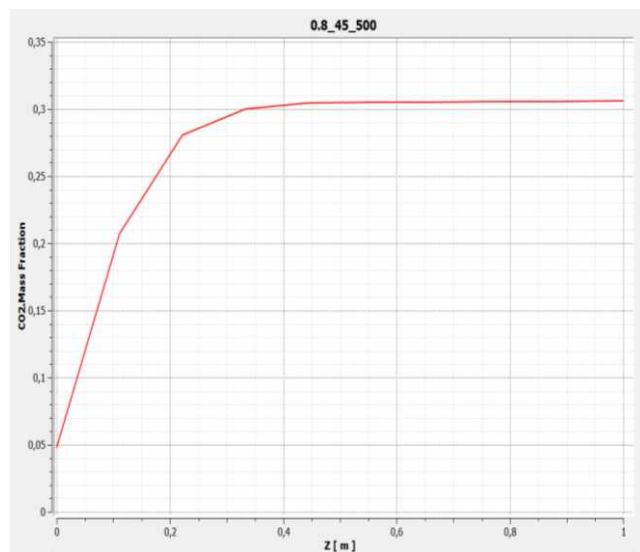


Масова концентрация на CO₂ при $h=0\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=45^\circ$ и $d=0.8\text{mm}$.

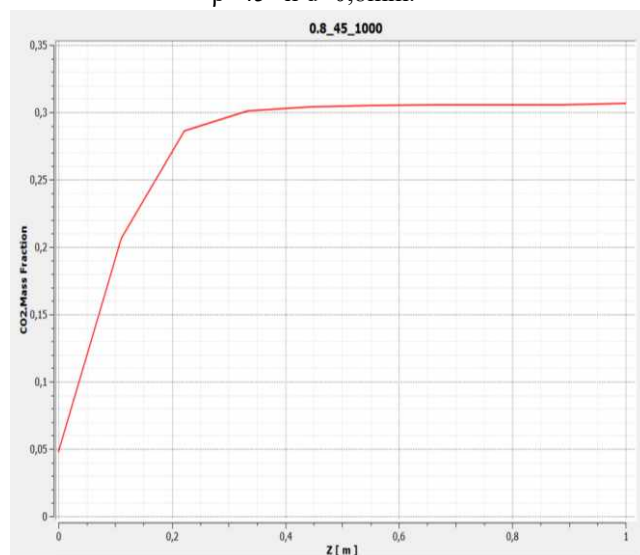


Масова концентрация на CO₂ при $h=100\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=45^\circ$ и $d=0.8\text{mm}$.

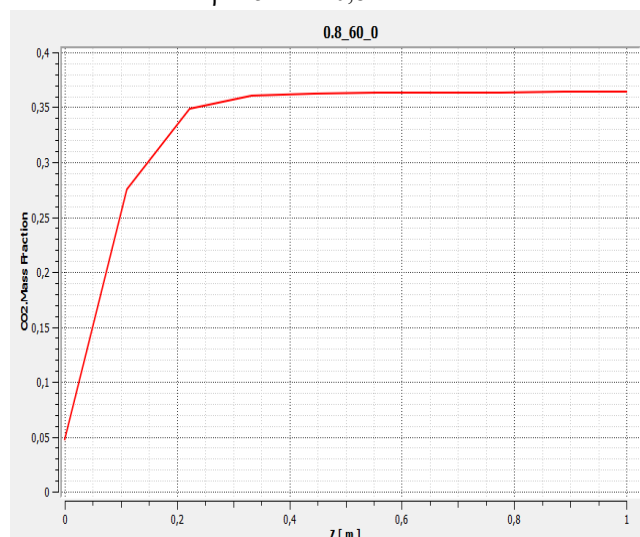
Приложение №45



Масова концентрация на CO₂ при $h=500\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=45^\circ$ и $d=0.8\text{mm}$.

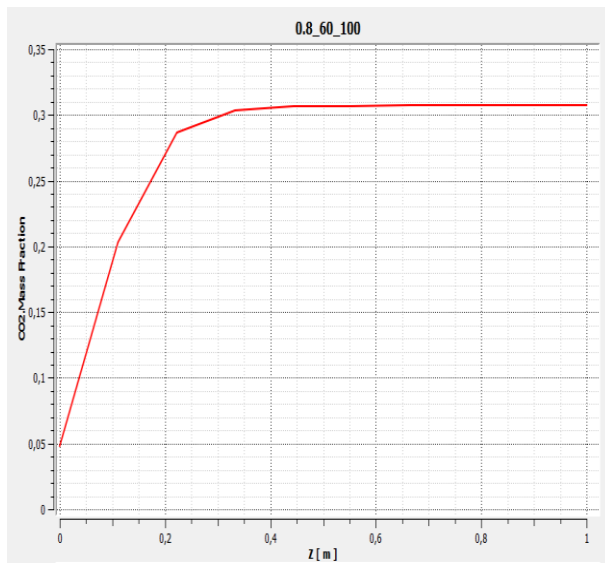


Масова концентрация на CO₂ при $h=1000\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=45^\circ$ и $d=0.8\text{mm}$.

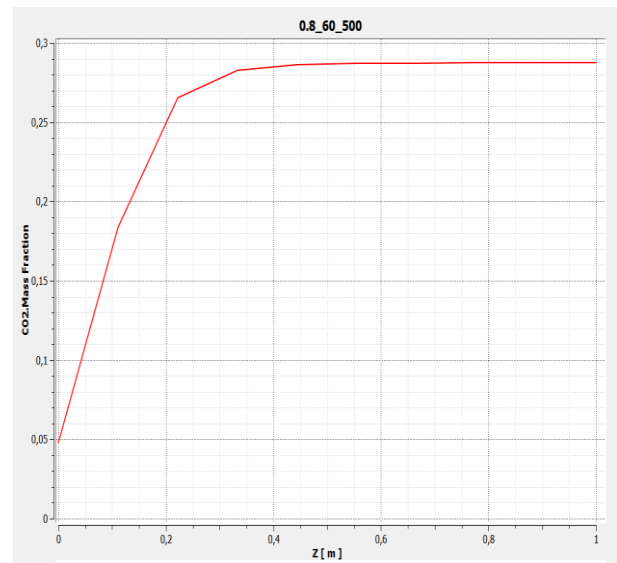


Масова концентрация на CO₂ при $h=0\text{W/m}^2\text{K}$, $\beta=60^\circ$ и $d=0.8\text{mm}$.

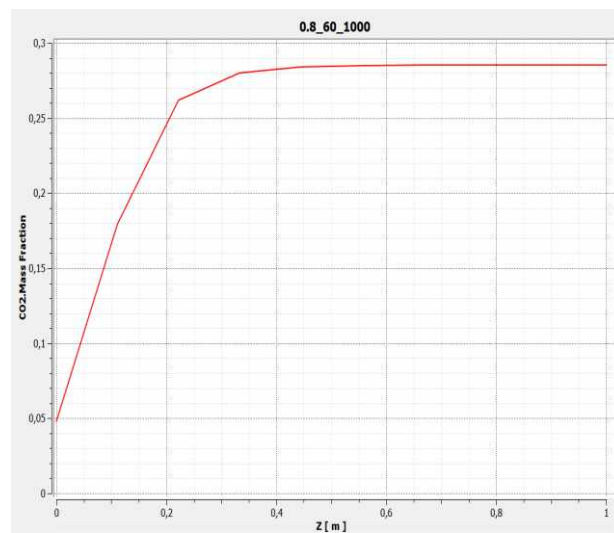
Приложение №46



Масова концентрация на CO₂ при h=100W/m²K, β=60° и d=0,8mm.



Масова концентрация на CO₂ при h=500W/m²K, β=60° и d=0,8mm.



Масова концентрация на CO₂ при h=1000W/m²K, β=60° и d=0,8mm.