

Ғ. Төлеуов, М.С. Исатаев, Ж.Қ. Сейдулла, А. Досанова, Ж. Төлен

*Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан
(E-mail: zhanibek.seidulla@kaznu.kz)*

Еркін турбулентті ағыншаны эксперименттік зерттеу

Мақалада шығар қимасы квадрат формалы соплодан ағып шығатын еркін турбулентті ағыншаның даму динамикасы зерттелді. Зерттеулер ағыншаға сыртқы әсер түсірілген және түсірілмеген жағдайларды қоса қамтиды. Термоанемометрдің көмегімен жылдамдықтың орташа және пульсациялық мәндері өлшенді, турбуленттіліктің деңгейлеріне талдау жасалды. Соплодан таралатын еркін ағыншаның өлшемсіз асқын температурасының ось бойындағы өзгерістері зерттелді. Ағыншадағы ағыстың құйындық құрылымын зерттеу үшін термоанемометрмен өлшенетін, осциллографтың экранында сақталатын жылдамдықтың лездік пульсациясының жазылуы әдісі қолданылды. Термоанемометрдің көмегімен жылдамдықтың орташа және пульсациялық мәндері, турбуленттіліктің деңгейлері (турбуленттіліктің қарқындылығы) өлшенді. Жылдамдықтың пульсациясының лездік өзгерісінің осциллограммаларына талдау жасау негізінде, ірі масштабты бірінші реттік құйындардың пайда болуы және олардың соплодан алыстауы кезіндегі даму жиіліктері есептелінді. Жылдамдықтың лездік пульсациясы дабылын созу осциллограммасына талдау жасау жылдамдық тербелісінің нақты берілген жиіліктері бар екендігін көрсетті. Жылдамдықтың осы тербелістері бастапқы бөлімшеде еркін шекаралық қабаттағы ірімаштабты дискреттік құйындардың пайда болу жиіліктерімен дәл келеді. Ағыстың бойымен төмен соплоның шығар қимасынан алыстаған сайын бірінші реттік құйындардың бір-бірімен әсерлесуі және олардың осінің негізінде іріленуі нәтижесінде үлкен амплитудалы төменгі жиіліктегі жылдамдықтардың тербелісі пайда болды.

Кілт сөздер: сопло, еркін ағынша, турбулентті ағыс, эксперименттік зерттеу, жылдамдық және температура профилдері.

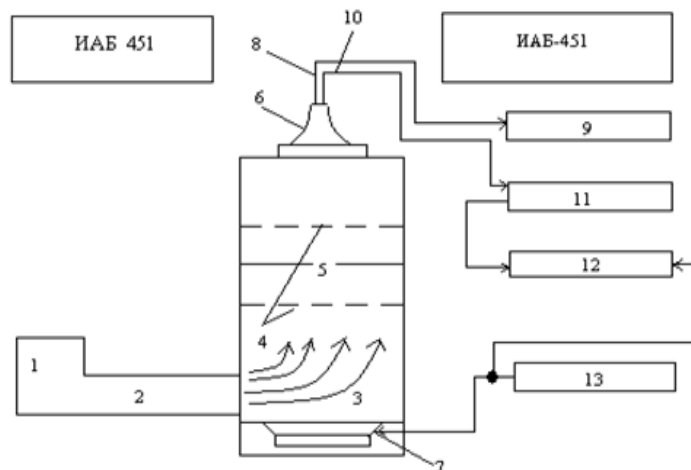
Кіріспе

Шығар қимасы квадрат формалы соплодан ағып шығатын еркін турбулентті ағынша жылдамдықтың дыбысқа дейінгі диапазонында әлі кең түрде зерттелмей келеді. Егерде квадрат формалы шығар қиманың екі қарама-қарсы жағын тұрақты қылып ұстап, оларға перпендикуляр екі жағын созатын болсақ, онда тіктөртбұрышты соплоны аламыз (анықтауыш параметр — созылу параметрі λ , мұндағы $\lambda = a/b$, a — шығар қиманың ұзындығы; b — шығар қиманың ені). Мұндай соплодан шығатын ағынша үшөлшемді. Осындай үшөлшемді турбуленттік еркін ағыншалар жалпы мольнан зерттелген [1–13]. Ал, бас жақта айтылған шығар қимасы квадрат формалы соплодан таралатын ағыншаны алатын болсақ ($\lambda = 1$), онда осы бағытты қамтитын кейбір аздаған жұмыстарды ғана атап кетуге болады [5, 10, 14, 15]. Квадрат формалы шығар қимасы бар соплодан ағып шығатын турбулентті ағыншаны тікелей эксперименттік зерттеуге қатысты [16] жұмысты айтып кетуге болады. Бұл жұмыста соплодан ағып шығатын турбулентті еркін ауа ағыншасының орташа динамикалық сипаттамалары кеңінен зерттелді. Зерттеу ағысқа сыртқы әсер (акустикалық) түсірілген және түсірілмеген кездерде де жүргізілді.

Аталған жұмыста осындай ағыншаны ары қарай зерттеу нәтижелері көрсетілген.

Эксперименттік зерттеулер үшін аппаратура

Тәжірибе 1-суретте көрсетілген қондырғы көмегімен жүргізілді. Желдеткіштен (1) шыққан ауа вибросөндіруші өтпеден (2) тыныштық камерасына (3) келіп түсіп, содан соң торлар (4) және (5) арқылы квадрат формалы шығыс кескіні бар соплодан (6) ағып шығады.



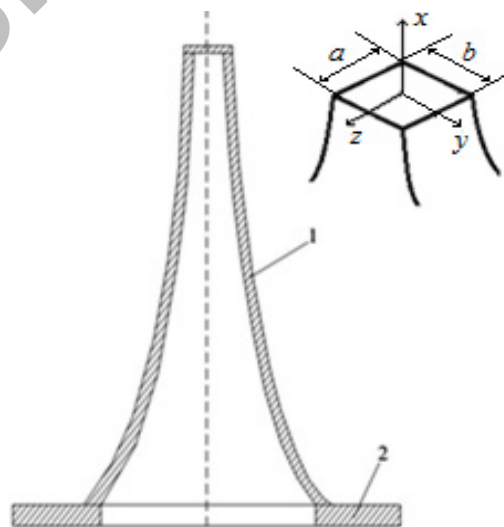
1 — желдеткіш; 2 — вибросөндіруші өтпе; 3 — тыныштық камерасы; 4 — түзету торлары; 5 — қыздырылатын тор; 6 — сопло; 7 — динамик; 8 — Пито түтікшесі; 9 — микроанометр; 10 — датчик; 11 — СТМ-02 типті термоанометрлік блок жүйесі; 12 — фазалық таңдау блогы; 13 — дыбыстық генератор

1-сурет. Тәжірибелік қондырғының сызбасы

Ағыншаның негізгі бөлігі көлеңкелі аспап ИАБ-451-дің жұмысшы бөлігінде орналасқан. Оның көмегімен ағыстың көлеңкелі лездік суретін зерттеуге болады. Ағыншаға әсер ету тыныштық камерада ағыншаның шығыс кескініне фронталды түрде орналасқан, қуаты 50 Вт болатын динамик (7) көмегімен іске асырылды. Дыбыс генераторынан (13) динамикке синусоидалы дабыл беріледі, соған байланысты ағыншаның шығыс кескінінде таңдап алынған жиіліктегі жылдамдықтың синусоидалы тербелісі пайда болады. Орташа жылдамдық пен динамикалық қысымды өлшеу үшін Пито түтігі (8) мен ММН-240 маркалы микроанометр (9) қолданылды.

Жұмыста термоанометрлік блок жүйесі (11) қолданылды. Ол сызықтандырылған шығыс сигналды жылдамдығы бар қосарналы термоанометрлік жүйеден, температураны түрлендіргіштен, фазалық таңдау блогынан (12) тұрады. Соплонның симметриялық үш өсі бойымен Пито түтікшесі мен датчиктің (10) орналасуы үшөлшемді координатник көмегімен жүзеге асырылады.

Витошинский формуласы бойынша, профильденген шығар қимасы квадрат формалы соплонның конструкциясы 2-суретте көрсетілген (суретке қосымша координата осьтері салынды). Соплонның сығылу дәрежесі $c = 10$ ($c = F_1 / F_2$, мұндағы F_1 — соплонның кіру ауданы; F_2 — оның шығу ауданы), соплонның биіктігі 90 мм-ге тең.



1 — сопло қабырғасы; 2 — сопло тағаны

2-сурет. Шығар қимасы квадрат формалы соплонның конструкциясы

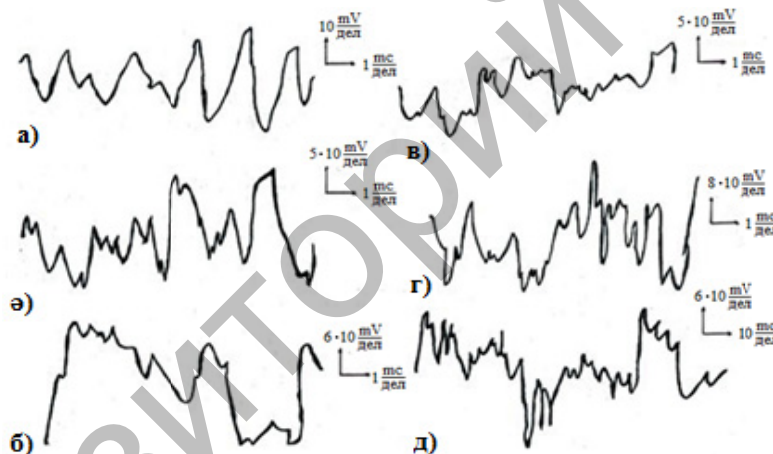
Алынған нәтижелер және оларды талдау

Ағыншадағы ағыстың құйындық құрылымын зерттеу үшін термоанемометрмен өлшенетін, осциллографтың экранында сақталатын жылдамдықтың лездік пульсациясының жазылуы әдісін қолдану қажет.

Термоанемометрдің көмегімен жылдамдықтың орташа және пульсациялық мәндері, турбуленттіліктің деңгейлері (турбуленттіліктің қарқындылығы) өлшенді. Жылдамдық пульсациясының лездік өзгерісінің осциллограммаларына талдау жасау негізінде ірімасштабты бірінші реттік құйындардың пайда болуы және олардың соплодан алыстауы кезіндегі даму жиіліктері есептелінді.

Жылдамдықтың лездік пульсациясы дабылын созу осциллограммасына талдау жасау жылдамдық тербелісінің нақты берілген жиіліктері бар екендігін көрсетеді. Жылдамдықтың осы тербелістері бастапқы бөлімшеде еркін шекаралық қабаттағы ірімасштабты дискреттік құйындардың пайда болу жиіліктерімен дәл келеді. Ағыстың бойымен төмен соплоның шығар қимасынан алыстаған сайын бірінші реттік құйындардың бір-бірімен әсерлесуі және олардың осының негізінде іріленуі нәтижесінде үлкен амплитудалы төменгі жиіліктегі жылдамдықтардың тербелісі пайда болады.

Сонымен қатар олардың фондында бірінші реттік құйындармен түсіндірілетін жоғарғы жиіліктегі жылдамдықтардың пульсациясы сақталады. Мысал ретінде 3-суретте ағыншаның осі бойынша әртүрлі қашықтықтарда, x/b параметрінің (калибр) әртүрлі мәндерінде алынған шығар қимасы квадрат формалы соплодан таралатын ағыншаның өстік жылдамдығының пульсациясының осциллограммалары көрсетілген.



$\lambda = 1, U_0 = 20, 7 м / с; f = 0; y = 0; z = 0; U_0$ — бастапқы жылдамдық;

f — сыртқы акустикалық әсер жиілігі; а) $x/b=2$; б) $x/b=6$; в) $x/b=10$; г) $x/b=18$; д) $x/b=26$; е) $x/b=30$

3-сурет. Шығар қимасы квадрат формалы соплодан таралатын ағыншаның осі бойындағы жылдамдық пульсациясының осциллограммалары

Зерттеу көрсеткендей, орташа жылдамдықтың кемуіне байланысты бірлік уақытта датчиктің жанынан өтетін құйындардың саны азаяды. Осы нәтижелерден шығатын қорытынды: соплодан ағыстың бойымен алыстаған сайын құйындар кішірек құйындарға бөлінбейді, құйындардың саны артпайды, ал оның есесіне үлкен размерлі ірі құйындарға бірігуі көрінеді. Екінші жағынан, осы топтардың ішіндегі әрбір құйын өзінің жекелігін соплоның шығар қимасынан өте үлкен арақашықтықта сақтай алады (30 калибрге шейін) және жылдамдық пульсациясын туғызады.

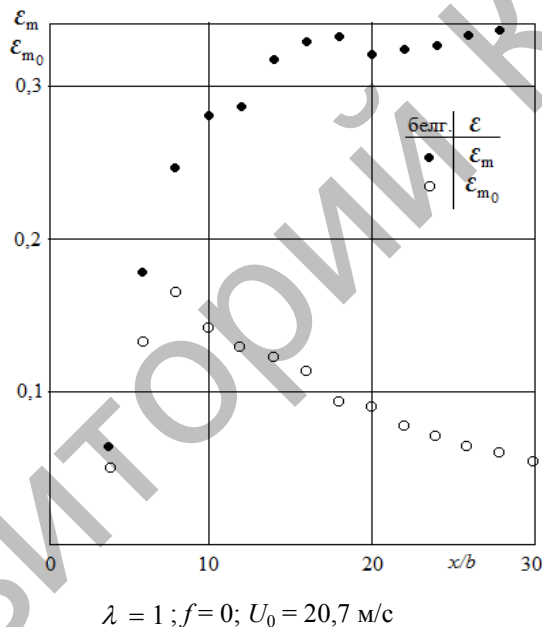
Жұмыста еркін ағыншаның пульсациялық сипаттамалары да зерттелді. Өлшеулер жүргізілмес бұрын термоанемометр тарировкаланды. Өстік максимал жылдамдыққа (U_m) шағылған және бастапқы жылдамдыққа (U_0) шағылған өстік жылдамдықтың пульсация қарқындылығы (турбуленттіліктің интенсивтілігі) ε_m және ε_{m_0} келесі формулалар көмегімен анықталды:

$$\varepsilon_m = \frac{\sqrt{U'^2}}{U_m} = \frac{4\bar{E}(\bar{E}^2 - E_0^2)\sqrt{e'^2}}{(\bar{E}_m^2 - E_0^2)^2}; \quad (1)$$

$$\varepsilon_{m_0} = \frac{\sqrt{U'^2}}{U_0} = \frac{4\bar{E}(\bar{E}^2 - E_0^2)\sqrt{e'^2}}{(\bar{E}_0^2 - E_0^2)^2}, \quad (2)$$

мұндағы \bar{E} — кез келген нүктедегі орташа кернеу; \bar{E}_m — ось бойындағы орташа кернеу; $\sqrt{e'^2}$ — ось бойындағы кернеудің орташа квадраттық пульсациясы; \bar{E}_0 — бастапқы кернеу; E_0^2 — тарировкалық графиктің көмегімен анықталған коэффициент; $\sqrt{U'^2}$ — жылдамдықтың өстік орташа квадраттық пульсациясы.

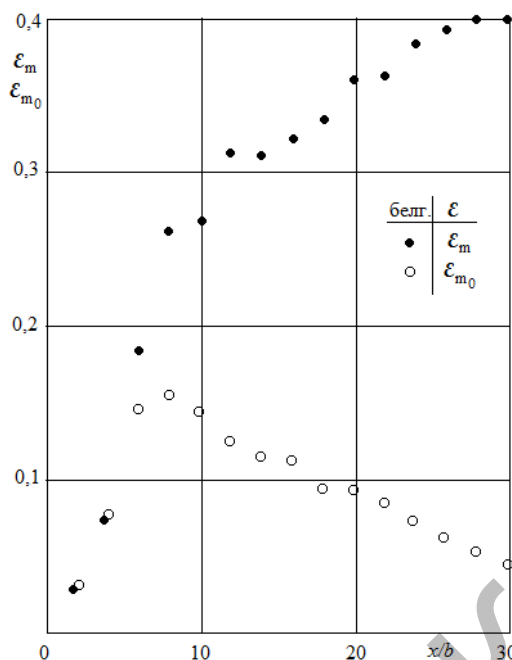
Шығар қимасы квадрат формалы соплодан шығатын ағыншадағы турбулентіліктің интенсивтілігінің ось бойымен таралу заңдылықтары 4- және 5-суреттерде көрсетілген. Суреттерден көретіміздей, екі жағдайда да (эсер бар және жоқ кездерде) ε_m және ε_{m_0} екеуде бастапқы да кілт жоғары көтеріледі, одан соң ε_{m_0} төмендеуі байқалады, ал ε_m өсу қарқыны ары қарай жалғаса береді.



4-сурет. Ағыншадағы турбулентіліктің интенсивтілігінің осьтік таралуы

Жұмыста шығар қимасы квадрат формалы соплодан ағып шығатын еркін ағыншаның көлденең қималарындағы жылдамдықтың профильдері зерттелді. Эксперимент нәтижелері 6-суретте көрсетілген. Тәжірибе ағыншаға сыртқы эсер түсірілген кезде жасалынды, эсер жиілігі $f = 421 \text{ Гц}$ тең. Суреттен көретіміздей, көлденең қималардағы жылдамдықтың профильдерінің әмбебаптылығы (аффинді тәріздестік) 6 калибрден ($x/b=6$) басталады.

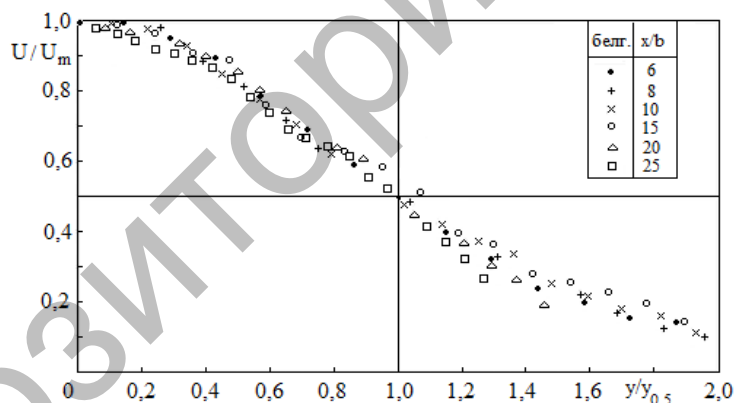
Ағыншаның шығу қимасында температураның біркелкі профилін алу кезінде біршама техникалық сипаттағы қиындықтар кездесті. Олар, біріншіден, ұсақ ұяшықты никель торлары таңдалғандықтан, екіншіден, контактілі қысқыштардың бір-біріне жақын орналасқандығынан жойылды.



$\lambda = 1; f = 200 \text{Гц}; U_0 = 20 \text{м/с}; Sh = 0,2$

$Sh = \frac{f \cdot b}{U_0}$ — Струхаль саны, мұндағы f — сыртқы акустикалық әсердің жиілігі

5-сурет. Ағыншадағы турбуленттіліктің интенсивтілігінің осьтік таралуы



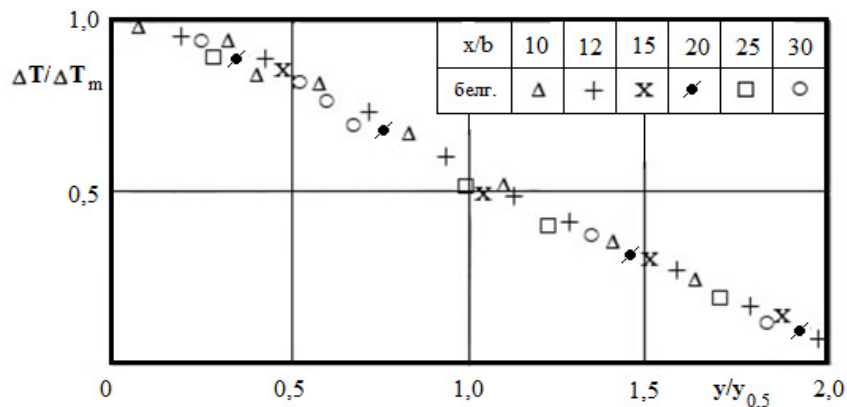
$U_0 = 20,9 \text{ м/с}; f = 421$

U — кез келген нүктедегі жылдамдық; $y_{0,5}$ — максималды жылдамдықтың жартысына ($U_m / 2$) сәйкес y

6-сурет. Шығар қимасы квадрат формалы соплодан ағып шығатын еркін ағыншаның көлденең қималарындағы жылдамдықтың профилдері

Осыған байланысты соплоның шығар қимасындағы температураның профилін біркелкі деп есептеуге болады. Тек соплоның ішкі жақтарынан жылу сыртқа таралатын облыстарда аздаған ауытқулар байқалады. Сондықтан соплоның шығар қимасындағы температураның көлденең профилінің тікбұрышты формада ауытқуын минимумға жеткізу үшін соплоның ішкі жақтары сыртқы ортадан мейлінше оқшауландырылды.

Жұмыста шығар қимасы квадрат формалы соплодан ағып шығатын ағыншаның негізгі бөлімшесіндегі, әртүрлі көлденең қималардағы орташа температураның өлшемсіз профилдері көрсетілген (7-сур.).



$$U = 21 \text{ м/с}; f = 0; \Delta T_0 = 30^\circ\text{C}$$

ΔT — ағыстың кез келген нүктесіндегі температура мен қоршаған ортадағы температураның айырымы; ΔT_m — ағыс өсі мен қоршаған ортадағы температура айырымы; ΔT_0 — соплоның шығар қимасындағы және қоршаған ортаның температуралар айырымы; $y_{0,5}$ — максималды жылдамдықтың жартысына ($U_m / 2$) сәйкес y

7-сурет. Шығар қимасы квадрат формалы соплодан таралатын еркін ағыншаның өлшемсіз асқын температурасының өс бойындағы өзгерісі

Жоғарыдағы суреттен көретініміздей, көлденең қималардағы температураның профильдерінің әмбебаптылығы негізгі бөлімшенің бас жағынан басталып, аяғына дейін жалғасады.

Әдебиеттер тізімі

- 1 Trentacoste N. Further experimental results for three-dimensional free jets / N. Trentacoste, P.M. Sforza // AIAA J. — 1967. — Vol. 5. — No. 5. — P. 885–890.
- 2 Sfeir A.A. The velocity and temperature fields of rectangular jets / A.A. Sfeir // Int. J. Heat and Mass Transfer. — 1976. — Vol. 19, No. 11. — P. 1289–1297.
- 3 Крашенинников С.Ю. Распространение струй из прямоугольных сопел, свободных и вблизи экрана / С.Ю. Крашенинников, Е.Г. Рогальская // Изв. АН СССР. МЖГ. — 1979. — № 4. — С. 39–48.
- 4 Абрамович Г.Н. О деформации поперечного сечения прямоугольной турбулентной струи / Г.Н. Абрамович // Изв. АН СССР. МЖГ. — 1983. — № 1. — С. 54–63.
- 5 Quinn W.R. Turbulent free jet flows issued from sharp-edged rectangular slots: the influence of slot aspect ratio / W.R. Quinn // Exp. Thermal Fluid Sci. — 1992. — Vol. 5. — No. 2. — P. 203–215.
- 6 Wilson R.V. Numerical simulation of turbulent jets with rectangular cross-section / R.V. Wilson, A.O. Demuren // ASME FED. — 1996. — No. 238. — P. 121–127.
- 7 Holdo A.E. Simulation of high-aspect-ratio jets / A.E. Holdo, B.A.F. Simpson // Int. J. Numer. Methods Fluids. — 2002. — Vol. 39. — No. 4. — P. 343–359.
- 8 Rembold B. Direct numerical simulation of a transitional rectangular jets / B. Rembold, N.A. Adams, L. Kleiser // Int. J. Heat Fluid Flow. — 2002. — Vol. 23. — Issue 5. — P. 547–553.
- 9 Berg J.R. Prediction of the flow structure in a turbulent rectangular free jet / J.R. Berg, S.J. Ormiston, H.M. Soliman // Int. Commun. Heat and Mass Transf. — 2006. — Vol. 33. — No. 5. — P. 552–563.
- 10 Faghani E. Numerical investigation of turbulent free jet flows issued from rectangular nozzles: the influence of small aspect ratio / E. Faghani, R. Maddahian, P. Faghani, B. Farhanieh // Archive of applied mechanics. — 2010. — Vol. 80. — No. 7. — P. 727–745.
- 11 Исатаев С.И. Экспериментальное исследование трехмерных турбулентных струй, истекающих из сопла с прямоугольным выходным сечением / С.И. Исатаев, Ғ. Төлеуов, М.С. Исатаев, Ш.А. Болысбекова // Инженерно-физический журн. — 2016. — Т. 89, № 2. — С. 383–387.
- 12 Исатаев М.С. Экспериментальное исследование распространения трехмерных турбулентных струй из прямоугольных сопел / М.С. Исатаев, Ғ. Төлеуов, К.А. Есеналина // Инженерно-физический журн. — 2017. — Т. 90, № 6. — С. 1543–1548.
- 13 Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович, Т.А. Гиршович, С.Ю. Крашенинников и др.; под ред. Г.Н. Абрамовича. — 2-е изд., перераб. и доп. — М., 1984. — С. 720.
- 14 Tsuchiya Y. On the spread of rectangular jets / Y. Tsuchiya, C. Horikoshi, T. Sato // Exp. Fluids 4. — 1986. — P. 197–204.
- 15 Quinn W.R. Experimental and numerical study of a turbulent free square jet / W.R. Quinn, J. Militzer // Phys. Fluids 31. — 1988. — P. 1017–1025.

16 Төлеуов Ғ. Шығар кимасы квадрат формалы соплодан ағып шығатын еркін турбулентті ағыншаны эксперименттік зерттеу / Ғ. Төлеуов, М.С. Исатаев, А.Б. Оралбаев, А. Артықбаева, М. Алтайқызы, Ш. Асылбекова // ҚазҰТЗУ хабаршысы. — Алматы, 2018. — № 2(126). — 233–242-б.

Г. Төлеуов, М.С. Исатаев, Ж.К. Сейдулла, А. Досанова, Ж. Толен

Экспериментальное исследование свободной турбулентной струи

В статье приведены результаты исследования динамики развития свободной турбулентной струи, вытекающей из сопла квадратного сечения. Исследования проводились как при наличии внешнего воздействия, так и без воздействия. Средние и пульсационные значения скорости измерялись с использованием термоанометра, был проведен анализ уровня турбулентности. Исследовались безразмерные профили температуры на оси свободной струи, выходящей из сопла. Для исследования вихревой структуры потока использовался метод мгновенной пульсации скорости, измеренный термоанометром и зафиксированный на экране осциллографа. Средние и пульсационные значения скорости, уровня турбулентности (интенсивности турбулентности) измеряли с помощью термоанометра. На основе анализа осциллограмм мгновенных пульсаций рассчитаны частоты развития при появлении крупномасштабных вихрей первого порядка и при их удалении от сопла. Анализ осциллограмм поперечной мгновенной пульсации показал, что колебания скорости имеют определенные частоты. Эти колебания скорости, проявляющиеся на начальном участке, в точности совпадают с частотами крупномасштабных дискретных вихрей, образующихся в свободном пограничном слое. Поскольку ниже по течению, с удалением от выходного сечения сопла, крупномасштабные вихри первого порядка взаимодействуют между собой и в результате увеличения это приводит к возникновению высокоамплитудных низкочастотных колебаний скорости.

Ключевые слова: сопло, свободной струя, турбулентное течение, экспериментальное исследование, профили температуры и скорости.

G. Toleuov, M.S. Isataev, Zh.K. Seidulla, A. Dosanova, Zh. Tolen

Experimental study of free turbulent jet

In the article the results of studying the dynamics of the development of a free turbulent jet flowing out of a square-shaped nozzle are presented. The studies were conducted both in the presence of external influence, and without influence. The average and pulsation values of the velocity were measured using a thermoanometer, and the turbulence level was analyzed. Dimensionless temperature profiles on the axis of the free jet emerging from the nozzle were studied. To study the vortex structure of the flow, the method of instantaneous velocity pulsation measured by a hot-wire anemometer and recorded on an oscilloscope screen was used. Average and pulsation values of speed, level of turbulence (intensity of turbulence) were measured using a hot-wire anemometer. Based on the analysis of the oscillograms of instantaneous pulsations, the development frequencies were calculated for the appearance of large-scale first-order eddies and for their distance from the nozzle. The analysis of the oscillograms of the transverse instantaneous pulsation showed that the speed fluctuations have certain frequencies. These oscillations of the velocity, which manifest themselves in the initial part, coincide exactly with the frequencies of large-scale discrete vortices formed in the free boundary layer. Since downstream, with distance from the nozzle exit section, large-scale first-order eddies interact with each other and, as a result of an increase, this leads to the appearance of high-amplitude low-frequency oscillations of velocity.

Keywords: nozzle, free jet, turbulent flow, experimental study, temperature and speed profiles.

References

- 1 Trentacoste, N., & Sforza, P.M. (1967). Further experimental results for three-dimensional free jets. *AIAA J.*, Vol. 5, No. 5, 885–890.
- 2 Sfeir, A.A. (1976). The velocity and temperature fields of rectangular jets. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 19, No.11, 1289–1297.
- 3 Krashenninnikov, S.Yu., & Rogalskaya, E.G. (1979). Rasprostranenie strui iz priamouholnykh sopel, svobodnykh i vblizi ekrana [Spreading a jet of rectangular nozzles, free and near the screen]. *Izvestiia AN SSSR. MZhH – Izv. Academy of Sciences of the USSR. MZHГ, 4, WITH*, 39–48 [in Russian].
- 4 Abramovich, G.N. (1983). O deformatsii poperechnogo secheniia priamouholnoi turbulentnoi strui [On the deformation of the cross section of a rectangular turbulent jet]. *Izvestiia AN SSSR. MZhH – Izv. Academy of Sciences of the USSR. MZHГ, 1, WITH*, 54–63 [in Russian].

- 5 Quinn, W.R. (1992). Turbulent free jet flows issued from sharp-edged rectangular slots: the influence of slot aspect ratio. *Exp. Thermal Fluid Sci., Vol. 5, No. 2*, 203–215.
- 6 Wilson, R.V., & Demuren, A.O. (1996). Numerical simulation of turbulent jets with rectangular cross-section. *ASME FED, No. 238*, 121–127.
- 7 Holdo, A.E., & Simpson, B.A.F. (2002). Simulation of high-aspect-ratio jets. *Int. J. Numer. Methods Fluids, Vol. 39, No. 4*, 343–359.
- 8 Rembold, B., Adams, N.A., & Kleiser, L. (2002). Direct numerical simulation of a transitional rectangular jets. *Int. J. Heat Fluid Flow, Vol. 23, Issue 5*, 547–553.
- 9 Berg, J.R., Ormiston, S.J., & Soliman, H.M. (2006). Prediction of the flow structure in a turbulent rectangular free jet. *Int. Commun. Heat and Mass Transf., Vol. 33, No. 5*, 552–563.
- 10 Faghani, E., Maddahian, R., Faghani, P., & Farhanieh, B. (2010). Numerical investigation of turbulent free jet flows issued from rectangular nozzles: the influence of small aspect ratio. *Archive of applied mechanics, Vol. 80, No. 7*, 727–745.
- 11 Isatayev, S.I., Toleuov, G., Isatayev, M.S., & Bolysbekova, Sh.A. (2016). Eksperimentalnoe issledovanie trekhmernykh turbulentnykh strui, istekaiushchikh iz sopla s priamouholnym vykhodnym secheniem [Experimental study of three-dimensional turbulent jets emanating from a nozzle with a rectangular exit section]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal – Physical Engineering Journal, Vol. 89, 2*, WITH, 383–387 [in Russian].
- 12 Isatayev, M.S., Toleuov, G., & Esenalina, K.A. (2017). Eksperimentalnoe issledovanie rasprostraneniia trekhmernykh turbulentnykh strui iz priamouholnykh sopel [An experimental study of the distribution of three-dimensional turbulent jets from rectangular nozzles]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal – Physical Engineering Journal, Vol. 90, 6*, 1543–1548 [in Russian].
- 13 Abramovich, G.N., Girshovich, T.A., Krashennikov, C.Yu. & et al. (1984). Teoriia turbulentnykh strui [Theory of Tours]. (2d ed.). G.N. Abramovich (Eds.). Moscow: WITH [in Russian].
- 14 Tsuchiya, Y., Horikoshi, C., & Sato, T. (1986). On the spread of rectangular jets. *Exp. Fluids 4*, 197–204.
- 15 Quinn, W.R., & Militzer, J. (1988). Experimental and numerical study of a turbulent free square jet. *Phys. Fluids 31*, 1017–1025.
- 16 Toleuov, G., Isatayev, M.S., Oralbaev, A.B., Artykbaeva, A., Altaieyva, M., & Asilbekova, Sh. (2018). Shyhar kimasy kvadrat formaly soplodan ahyp shyhatyn erkin turbulentti ahynshany eksperimenttik zertteu [Experimental study of the free turbulent stream from the quadratic form of the crosswalks]. *KazUTZU khabarshysy – Bulletin of KAZTITU, 2 (126)*, 233–242. Almaty [in Kazakh].