

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 6, Number 316 (2017), 154 – 162

Ye. Moisseyeva¹, A. Naimanova²

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan;

²Institute of Mathematics and Mathematical Modeling MES RK, Almaty, Kazakhstan

E-mail: ¹k.moisseyeva@gmail.com, ²alt_naimanova@yahoo.com

**EFFECT OF BOUNDARY LAYER THICKNESS
AT INLET ON PATTERNS OF INTERACTION
OF SUPERSONIC FLOW WITH TRANSVERSE INJECTED JET**

Abstract. In the paper, the numerical investigation of the supersonic turbulent multispecies flow with transverse jet injection is performed. An effect of the boundary layer thickness at the inlet on the vortex system and mixing layer is studied. The value of the boundary layer thickness, for which there is an additional multi-structural separation zone ahead of the jet, is determined; the new vortices in front of the jet are identified. It is shown that with decreasing the thickness of the boundary layer at the inlet, the number of vortices in front of the jet is reduced, while additional vortex structures form behind the jet. An effect of the vortex systems on the jet / main flow mixing is revealed.

Keywords: turbulence, boundary layer, mixing layer, supersonic flow, transverse injection.

УДК: 533.6.011.5: 532.526

Е.С. Моисеева¹, А.Ж. Найманова²

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²Институт математики и математического моделирования МОН РК, Алматы, Казахстан

**ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ВХОДЕ
НА МЕХАНИЗМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕРХЗВУКОВОГО
ПОТОКА С ПОПЕРЕЧНО ВДУВАЕМОЙ СТРУЕЙ**

Аннотация. В данной работе выполнено численное исследование сверхзвукового течения многокомпонентной газовой смеси с поперечным вдувом струи. Изучено влияние толщины пограничного слоя на входе на вихревую систему и слой смешения. Определено значение толщины пограничного слоя, при котором возникает дополнительная многоструктурная область отрыва перед струей, получены новые вихревые системы перед струей. Показано, что при уменьшении толщины пограничного слоя на входе количество вихрей перед струей сокращается, тогда как за струей появляются дополнительные вихревые структуры. Выявлено влияние вихревых систем на процесс смешения вдуваемой струи и натекающего потока.

Ключевые слова: турбулентность, пограничный слой, слой смешения, сверхзвуковое течение, поперечный вдув.

1. Введение. Поперечный вдув струи в поток является эффективным способом сверхзвукового смешения и горения в сверхзвуковых камерах сгорания. На практике проблема взаимодействия газовой струи со сверхзвуковым потоком является основной в моделировании сверхзвуковых камер сгорания. Поле течения в такого рода установках достаточно сложное: турбулентное перемешивание топлива с окислителем, химические реакции, ударные волны, отрывная зона перед струей и за ней. Анализ влияния режимных параметров на механизмы взаимодействия струи и

потока, например, параметра нерасчетности, типа вдуваемого газа, местоположения вдува или толщины пограничного слоя, задаваемой на входе при расчете течения, позволяет улучшить эффективность сверхзвукового смешения. Однако при этом до настоящего момента не изучено в полной мере влияние толщины пограничного слоя на слой смешения.

Общая структура картины течения сверхзвукового потока с поперечно вдуваемой струей показана на рисунке 1 [1]. Турбулентный пограничный слой перед струей характеризуется парой противоположно вращающихся вихрей [1-3]. Эти вихри сносятся вниз по течению основным потоком, образуя подковообразные вихри и вихревой след в области за вдувом струи. Однако известны некоторые работы [2,4-8], в которых показаны дополнительные вихревые структуры в зависимости от режимных и геометрических параметров. Целью настоящей работы является изучение влияния толщины пограничного слоя на входе на механизмы взаимодействия струи и потока, в частности, на формирование вихревых систем за вдувом, которые определяются состоянием пограничного слоя перед струей и влияют на слой смешения.

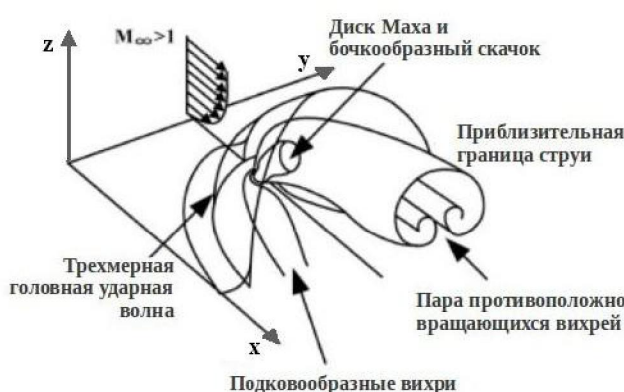


Рисунок 1 – Схематическое изображение поперечного вдува струи в сверхзвуковой поток [1]

2. Математическая модель и численный метод решения. Исходными уравнениями для рассматриваемой задачи является система осредненных по Фавру уравнений Навье-Стокса для многокомпонентного турбулентного газа. Характерным параметром длины является диаметр сопла. Коэффициент динамической вязкости определяется как сумма коэффициентов молекулярной и турбулентной вязкости, где молекулярная вязкость определяется по формуле Уилке [9], а турбулентная вычисляется с помощью $k-\omega$ модели с учетом сжимаемости. На входе задаются параметры воздушного потока и вблизи стенки пограничный слой, на вдуве струи – параметры струи водорода. На нижней стенке выполняются условия прилипания и теплоизоляции, на верхней границе – условие симметрии, на боковых – мягкие граничные условия, и на выходной границе задаются условия неотражения [10].

Численное решение поставленной задачи осуществляется на основе существенно-неосциллирующей ENO-схемы третьего порядка точности, методология может быть найдена, например, в работах [11-12]. Решение полученной системы разностных уравнений осуществляется согласно принципу расщепления по направлениям методом матричной прогонки.

3. Результаты. Для верификации математической модели и апробации численного метода предварительно решается задача пространственного сверхзвукового турбулентного течения воздуха в канале с характерными параметрами, соответствующими эксперименту [13]: $Pr = 0.9$, $\gamma = 1.4$, $Re = 6.31 \cdot 10^4$, $M_\infty = 4$, $T_\infty = 500K$, индекс « ∞ » относится к параметрам потока. На рисунке 2 представлены основные характеристики течения в пограничном слое – распределение давления и профиль продольной скорости. Измерение проводится вблизи стенки в плоскости симметрии, нормальной к оси y , в сечении, где толщина пограничного слоя равна $\delta = 2.7$ ($z^+ = 5694$). Здесь $z^+ = zu_\tau Re$ – универсальная динамическая переменная, $u_\tau = (0.5C_f)^{1/2}$

– динамическая скорость, $C_f = 0.0576(\text{Re}x)^{-1/5}$ – местный коэффициент сопротивления на стенке [14]. Из графика видно, что распределение давления (рисунок 2а) и профиль скорости (рисунок 2б) удовлетворительно согласуются с результатами работ [13,15-16].

Далее, для расчета поставленной задачи перпендикулярного вдува круглой струи водорода в трехмерный канал (рисунок 1) центр сопла помещается согласно [13] в сечении, соответствующем толщине пограничного слоя в канале $\delta_0=2.7$. Параметры струи также задаются в соответствии с экспериментом [13]: $M_0=1$, $T_0=1300\text{K}$; отношение динамических давлений $q \equiv \rho_0 \vec{V}_0^2 / \rho_\infty \vec{V}_\infty^2 = 1.0$, что соответствует $n=15.61$; $d=1.05\text{мм}$, индекс «0» относится к параметрам струи. Расчеты проводятся со следующими геометрическими параметрами: $H_x=20$ – длина, $H_y=15$ – ширина и $H_z=10$ – высота расчетной области в калибрах; $x_0=10$, $y_0=7.5$ – расстояние от начала расчетной области до центра сопла.

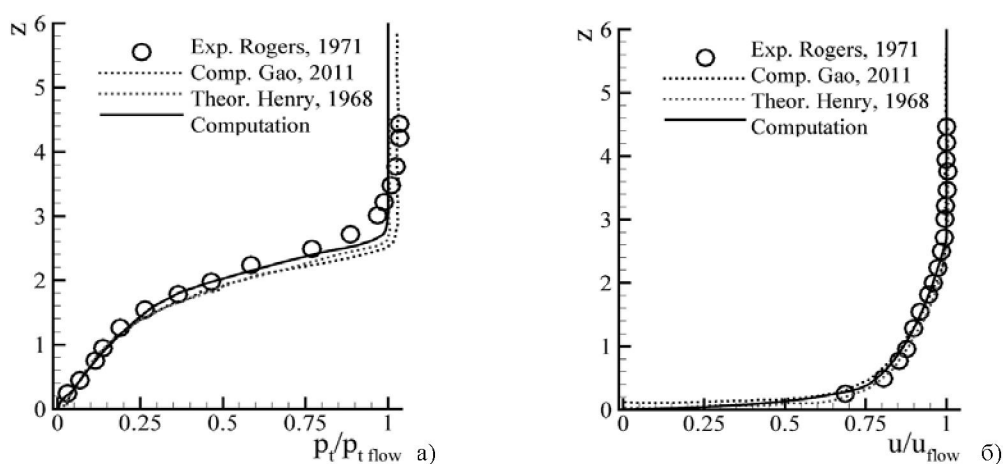


Рисунок 2 – Характеристики пограничного слоя в канале без вдува струи на стенке в плоскости симметрии, нормальной к оси y , результаты работ [13,15-16] и численный расчет: а) распределение полного давления, б) профиль скорости

На рисунке 3 показано поле изобар в плоскости симметрии, нормальной к оси. Вследствие торможения потока перед струей повышается давление и возникает головной скачок уплотнения 1. Вверх по течению от него отходит косой скачок уплотнения 2, за которым наблюдается зона сверхзвукового течения. Последующее торможение потока сопровождается повышением давления и появлением ударной волны – замыкающего скачка уплотнения 3, параллельного оси струи. Вследствие пересечения ударных волн 1, 2 и 3 образуется сложная λ -образная структура волн.

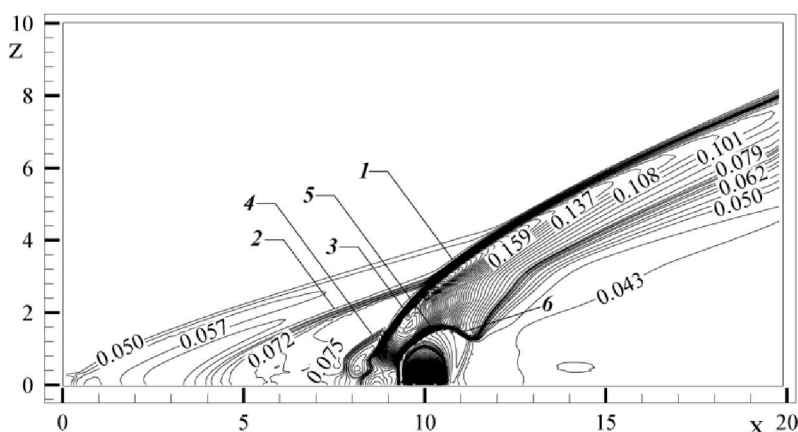


Рисунок 3 – Изобары в плоскости симметрии, нормальной к оси y , $\delta_0=2.7$

В передней застойной зоне давление понижается (линия 4) ввиду наибольшей скорости возвратного течения. За струей находится зона разрежения. На рисунке также виден висячий скачок 5. Его формирование обусловлено тем, что в результате вдува недорасширенной струи в поток давление в струе стремится выровняться с давлением окружающей среды, вследствие чего происходит расширение струи и образуются волны разрежения, которые движутся к границам струи. Семейство отраженных от границы струи волн разрежения формирует висячий скачок 5, замыкающийся диском Маха 6.

На рисунке 4 представлены линии тока и распределение массовой концентрации водорода в плоскости симметрии, нормальной к оси y . В большинстве известных работ, например, [1-3], рассматривается структура течения перед струей, состоящая только из двух подковообразных вихрей, существует также несколько работ, в которых описан третичный вихрь [2,4-6], однако здесь показано формирование двух пар вихрей (V_1 - V_4 , V_2 - V_3). При этом вихри V_2 и V_3 , примыкающие к стенке, вращаются против часовой стрелки, а вихри V_1 и V_4 – по часовой стрелке. Рассмотрим подробно механизм их образования.

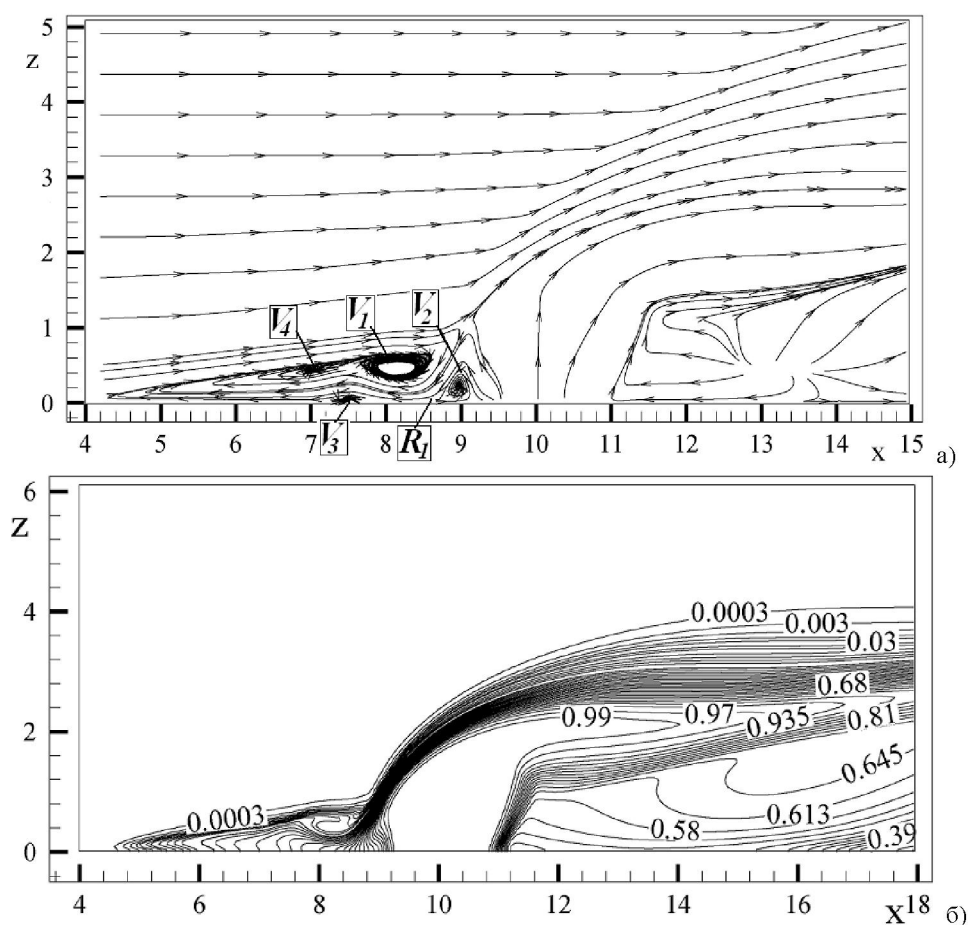


Рисунок 4 – Линии тока (а) и распределение массовой концентрации водорода (б) в плоскости симметрии, нормальной к оси y , $\delta_0=2.7$

Первый вихрь V_1 формируется вследствие отрыва пограничного слоя перед струей. Взаимодействие расширяющейся струи и замыкающего скачка уплотнения 3 на рисунке 3 приводит к появлению второго вихря V_2 . При этом из графика 4а видно, что эти вихри вращаются в противоположных направлениях. Очевидно, это объясняется тем, что часть потока воздуха непосредственно вблизи стенки, проходя участки скачков уплотнения, поворачивает вниз к стенке и проникает в зону отрывного течения, а затем растекается в противоположных направлениях, в результате чего образуется линия растекания потоков R_1 . При тчении газа в обратном

направлении от линии растекания R_1 пограничный слой повторно отрывается с образованием вихря V_3 . Очевидно, этот отрыв обусловлен ростом градиента давления вследствие следа слабого скачка 4 на рисунке 3. Далее поток отклоняется вверх из-за присутствия вихря V_3 , тогда как сверху на вихрь V_1 натекает основной поток, вследствие чего происходит пережим вихря V_1 и он разделяется на два с появлением вихря V_4 .

Влияние вихревой системы перед струей на процесс смешения струи и потока демонстрирует картина распространения массовых концентраций водорода. Так, из графика 4б видно, что часть водорода в области перед струей захватывается подковообразными вихрями V_1 - V_2 и распределяется вверх по потоку вплоть до линии отрыва.

На рисунке 5 показаны линии тока и распределение массовой концентрации водорода за струей в плоскости yz ($x=13.835$). Появление пары симметричных вихрей V_5 обусловлено тем, что непосредственно за струей у стенки образуется область пониженного давления, куда устремляется натекающий поток. Вихрь V_1 перед струей увлекается основным потоком и, разделяясь, генерирует систему V_6 . Вихри V_7 формируются вследствие бокового перетекания вихря V_3 . Незначительный размер этих вихрей обусловлен тем, что размер порождающего их вихря V_3 также мал. Пара вихрей V_8 генерируется вихрем V_2 .

Расчеты показывают, что за бочкообразной структурой за струей вихри V_8 смещаются к плоскости симметрии, а вихревые системы V_6 и V_7 удаляются от плоскости симметрии по мере их сноса вниз по потоку. Вихри V_8 с центрами вращения в слое смешения струи и потока, обтекая струю, увеличиваются в размере по мере их сноса вниз по потоку. Увеличение размеров этих вихрей вблизи струи, по всей видимости, обеспечивается наличием существенных градиентов давлений на границе струи и потока. Из рисунка 5а также заметно, что вихревые системы V_6 и V_7 служат своего рода кавернами для роста вихря V_8 , т.е. по мере удаления от плоскости симметрии вихрей V_6 и V_7 , каверна увеличивается, соответственно вихрь V_8 расширяется.

Рисунок 5б демонстрирует влияние боковых вихрей на расширение струи. С удалением от вдува вниз по потоку ядро максимальных концентраций уменьшается, а область смешения расширяется. Из сравнения рисунка 5а с рисунком 5б видно, что водород в основном скапливается в области вихрей V_8 . Здесь также можно увидеть роль вихрей V_6 и V_7 , образующих каверну. При этом численные расчеты показывают, что основной вклад в смешение струи и потока вносят подковообразные вихри V_6 и V_8 .

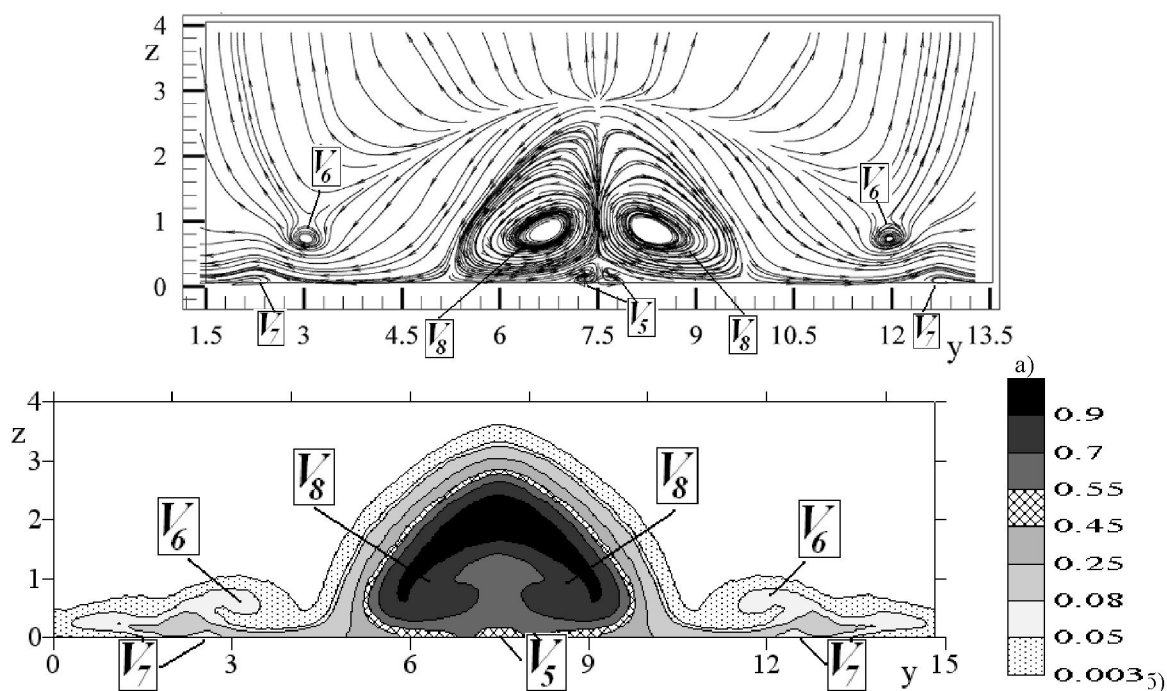


Рисунок 5 – Линии тока (а) и распределение массовой концентрации водорода (б) в сечении $x=13.835$, нормальной к оси x , $\delta_0=2.7$

Следует отметить, что в работе [7] были получены дополнительные вихревые системы в верхней и нижней частях области смешения за струей для задачи вдува одноатомного газа с параметрами нерасчетности $n=10$ и более. Однако приведенный выше анализ показывает, что в настоящем исследовании дополнительные вихревые системы в этих областях не наблюдаются. По-видимому, отсутствие этих вихрей обусловлено тем, что здесь расчеты производились с пограничным слоем на входе толщиной $\delta_0=2.6$, тогда как в [7] его толщина задавалась $\delta_0=1$, $Re=1.87 \cdot 10^7$.

Численные эксперименты, выполненные при меньших значениях толщины пограничного слоя, показывают уменьшение числа вихрей перед струей. К примеру, ниже (рисунки 6-8) приводятся результаты расчетов для случая, когда центр вдува струи помещается в точке, где толщина пограничного слоя в канале $\delta_0=0.616$. Для картины распределения изобар в плоскости симметрии (рисунок 6) не наблюдается заметного качественного расхождения с вышеописанным (рисунок 2). Однако в этом случае расчеты демонстрируют наличие только двух вихрей V_1 и V_2 и отклонение линий тока вблизи стенки (рисунок 7а). Видно, что отклонение потока от отрыва является недостаточным для разделения вихря V_1 . За струей рисунок 7а демонстрирует возникновение у основания диска Маха вихря V_9 , который и наблюдался в работе [7]. Формирование этого вихря обусловлено взаимодействием струи и восходящего потока под струей. В поперечном сечении (рисунок 8а) вихревые системы качественно не отличаются от систем для $\delta_0=2.7$ (рисунок 5а).

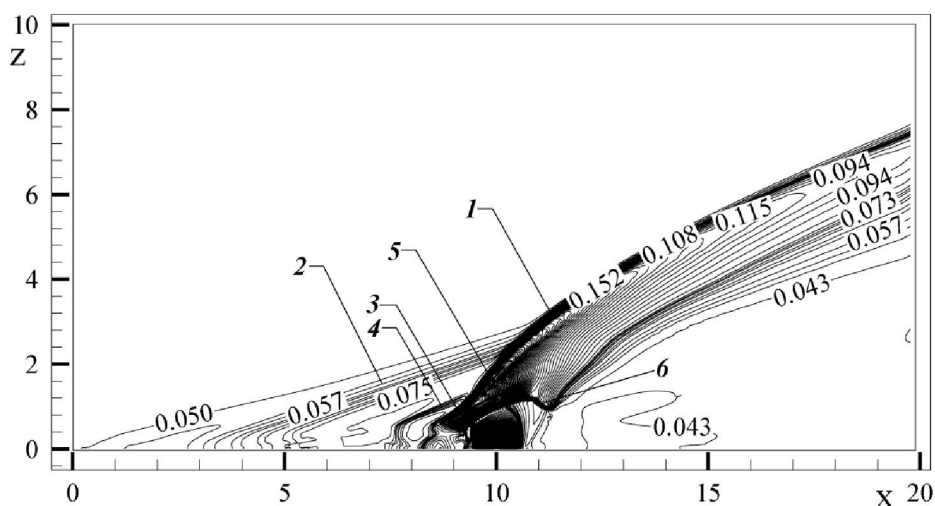


Рисунок 6 – Изобары в плоскости симметрии, нормальной к оси y , $\delta_0=0.616$

Из сравнения рисунков 4б и 7б видно, что при «тонком» пограничном слое подковообразные вихри выносят водород дальше вверх по потоку (перед струей), чем при «толстом». За вдувом струи при $\delta_0=2.7$ в области вблизи стенки наблюдается как водород, так и воздух, тогда как при $\delta_0=0.616$ только водород, т.е. в этом случае значения массовой концентрации водорода вблизи стенки значительно выше ($Y_1=0.903$ при $\delta_0=0.616$, $Y_1=0.39$ при $\delta_0=2.7$). Таким образом, при «тонком» пограничном слое смешение в основном происходит в верхней части слоя смешения, а большая часть водорода сконцентрирована вблизи стенки. Кроме того, сравнение рисунков 4б и 7б также показывает незначительное увеличение высоты проникновения водорода при $\delta_0=0.616$. В поперечном сечении ($x=13.385$, рисунки 5б, 8б), слой смешения при $\delta_0=2.7$ больше, чем при $\delta_0=0.616$. Максимальные значения массовой концентрации водорода при $\delta_0=2.7$ локализованы в ядре струи, тогда как при $\delta_0=0.616$ значение $Y_1=0.55$ достигает боковых границ.

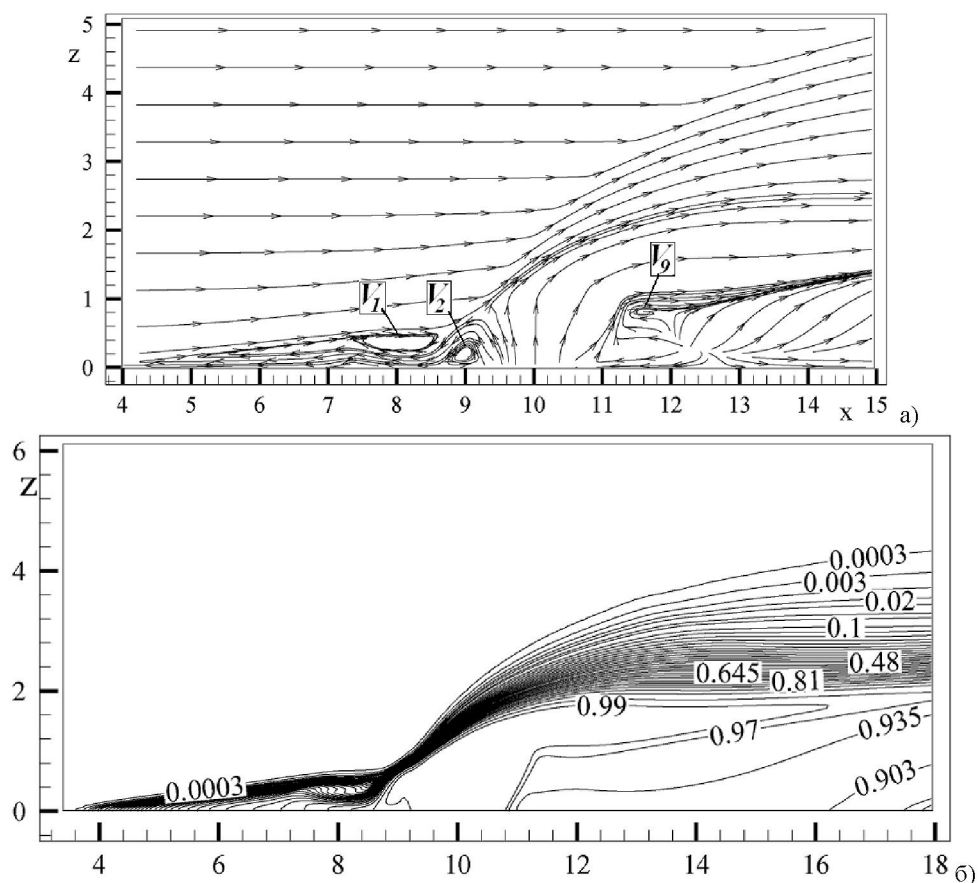


Рисунок 7 – Линии тока (а) и распределение массовой концентрации водорода (б) в плоскости симметрии, нормальной к оси y , $\delta_0=0.616$

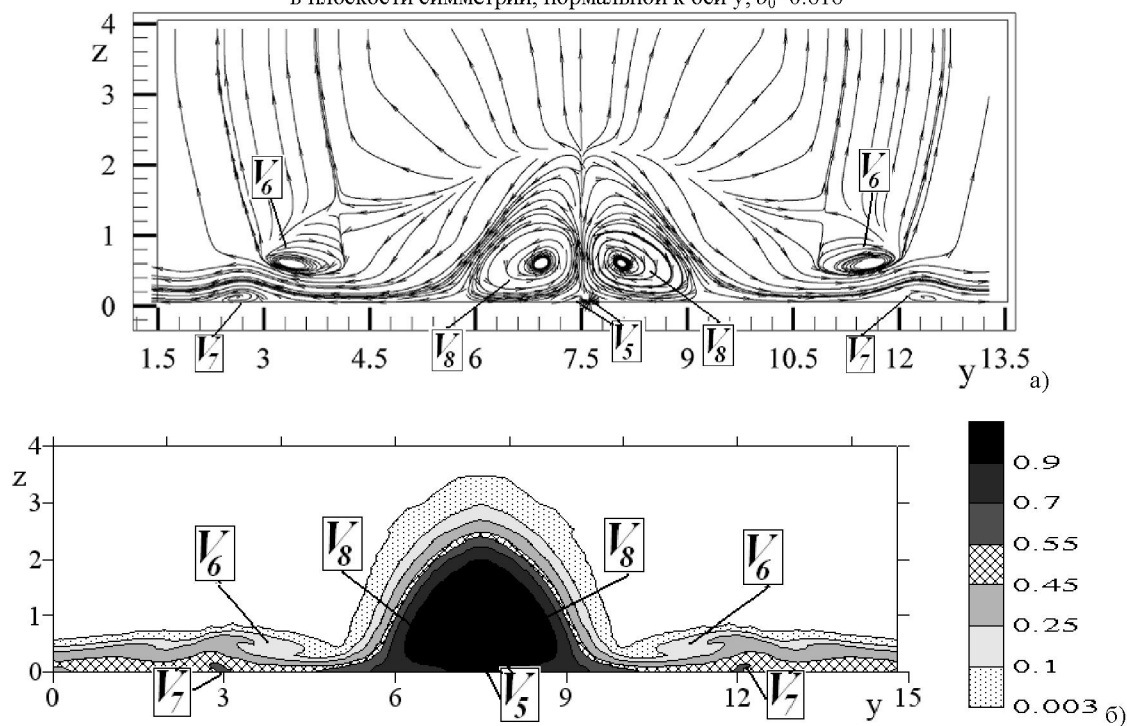


Рисунок 8 – Линии тока (а) и распределение массовой концентрации водорода (б) в сечении $x=13.835$, нормальной к оси x , $\delta_0=0.616$

Заключение. Вычислительные эксперименты, проведенные с целью выявить механизмы

образования вихревых систем, показали, что толщина пограничного слоя оказывает существенное влияние на вихревую структуру и слой смешения. Однако необходимы дальнейшие исследования в отношении отрывной зоны. Таким образом, следующий этап работы будет направлен на сравнение распределения давления на стенке с экспериментальными данными для количественной оценки длины зоны отрыва и подтверждения присутствия дополнительных вихрей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gruber MR, Nejad AS, Chen TH, Dutton JC. (2000) Transverse injection from circular and elliptic nozzles into a supersonic crossflow, *J Propul Power*, 16:449-457. DOI: 10.2514/2.5609
- [2] Erdem E, Kontis K. (2010) Numerical and experimental investigation of transverse injection flows, *Shock Waves*, 20:103-118. DOI: 10.1007/s00193-010-0247-1
- [3] Viti V, Neel R, Schetz J. (2009) Detailed flow physics of the supersonic jet interaction flow field, *Phys Fluids*, 21:1-16. DOI: 10.1063/1.3112736
- [4] Chenault CF, Beran PS. (1998) K- ϵ and Reynolds stress turbulence model comparisons for two-dimensional injection flows, *AIAA J*, 36:1401-1412. DOI: 10.2514/2.561
- [5] Borovoy V, Egorov I, Mosharov V, Radchenko V, Skuratov A, Struminskaya I. (2016) Entropy-layer influence on single-fin and double-fin/boundary-layer interactions, *AIAA J*, 54: 443-457. DOI: 10.2514/1.J053656
- [6] Borovoy V.Ya., Egorov I.V., Mosharov V.E., Radchenko V.N., Skuratov A.S., Struminskaya I.V. (2014) Shock waves/turbulent boundary layer interference near a fin and a pair of fins at the presence of entropy layer. *Proceedings of International Conference on Methods of Aerophysical Research*, Novosibirsk, Russia. P. 1-9.
- [7] Beketaeva A, Bruel P, Naimanova A. (2015) Vortical structures behind a transverse jet in a super-sonic flow at high jet to crossflow pressure ratios, *J Appl Mech Tech Phys*, 56:777-788. DOI: 10.1134/S0021894415050041
- [8] Dickmann DA, Lu FK. (2008) Shock/Boundary Layer Interaction Effects on Transverse Jets in Crossflow Over a Flat Plate. *Proceedings of 38th Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, Seattle, USA. Paper AIAA 2008-3723
- [9] Лойцянский ЛГ (2003) Механика жидкостей и газа, седьмое издание. М.: Дрофа, Россия. ISBN: 5-7107-6327-6
- [10] Poinso TJ, Lele SK. (1992) Boundary conditions for direct simulation of compressible viscous flows, *J Comput Phys*, 101:104-129. DOI: 10.1016/0021-9991(92)90046-2
- [11] Бруэль П, Найманова А. (2010) Расчет нормального вдува струи водорода в сверхзвуковом потоке воздуха, *Теплофизика и аэромеханика*, 17:565-546.
- [12] Моисеева ЕС, Найманова АЖ. (2014) Сверхзвуковое течение многокомпонентной газовой смеси с вдувом струи, *Вычислительные технологии*, 19: 51-66.
- [13] Rogers RC (1971) A study of the mixing of hydrogen injected normal to a supersonic airstream. NASA, Washington, United States, Report TN D-6114.
- [14] Шлихтинг Г (1974) Теория пограничного слоя. М.: Наука.
- [15] Gao ZX, Lee CH. (2011) Numerical research on mixing characteristics of different injection schemes for supersonic transverse jet, *Science China Technological Sciences*, 54:883-893. DOI: 10.1007/s11431-010-4277-9
- [16] Henry JR, Andrews EH, Jr., Pinckney SZ, McClinton CR., (1968) Boundary layer and starting problems on a short axisymmetric scramjet inlet, *Compressible Turbulent Boundary Layers*, 481-508, NASA SP-216.

REFERENCES

- [1] Gruber MR, Nejad AS, Chen TH, Dutton JC. (2000) Transverse injection from circular and elliptic nozzles into a supersonic crossflow, *J Propul Power*, 16:449-457. DOI: 10.2514/2.5609.
- [2] Erdem E, Kontis K. (2010) Numerical and experimental investigation of transverse injection flows, *Shock Waves*, 20:103-118. DOI: 10.1007/s00193-010-0247-1.
- [3] Viti V, Neel R, Schetz J. (2009) Detailed flow physics of the supersonic jet interaction flow field, *Phys Fluids*, 21:1-16. DOI: 10.1063/1.3112736.
- [4] Chenault CF, Beran PS. (1998) K- ϵ and Reynolds stress turbulence model comparisons for two-dimensional injection flows, *AIAA J*, 36:1401-1412. DOI: 10.2514/2.561.
- [5] Borovoy V, Egorov I, Mosharov V, Radchenko V, Skuratov A, Struminskaya I. (2016) Entropy-layer influence on single-fin and double-fin/boundary-layer interactions, *AIAA J*, 54: 443-457. DOI: 10.2514/1.J053656 .
- [6] Borovoy V.Ya., Egorov I.V., Mosharov V.E., Radchenko V.N., Skuratov A.S., Struminskaya I.V. (2014) Shock waves/turbulent boundary layer interference near a fin and a pair of fins at the presence of entropy layer. *Proceedings of International Conference on Methods of Aerophysical Research*, Novosibirsk, Russia. P. 1-9.
- [7] Beketaeva A, Bruel P, Naimanova A. (2015) Vortical structures behind a transverse jet in a super-sonic flow at high jet to crossflow pressure ratios, *J Appl Mech Tech Phys*, 56:777-788. DOI: 10.1134/S0021894415050041.
- [8] Dickmann DA, Lu FK. (2008) Shock/Boundary Layer Interaction Effects on Transverse Jets in Crossflow Over a Flat Plate. *Proceedings of 38th Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, Seattle, USA. Paper AIAA 2008-3723.
- [9] Loytsyanskiy LG (1966) Mechanics of liquids and gases, second edition. Pergamon Press, Oxford, UK. ISBN: 9780080101255.
- [10] Poinso TJ, Lele SK. (1992) Boundary conditions for direct simulation of compressible viscous flows, *J Comput Phys*,

101:104-129. DOI: 10.1016/0021-9991(92)90046-2.

[11]Briel P, Naimanova A. (2010) Computation of the normal injection of a hydrogen jet into a supersonic air flow, Thermophys Aeromech, 17:531-542. DOI: 10.1134/S0869864310040050.

[12]Moiseeva Ye, Naimanova A. (2014) Supersonic flow of multicomponent gaseous mixture with jet injection, Computational Technologies, 19:51-66. (In Russian).

[13]Rogers RC (1971) A study of the mixing of hydrogen injected normal to a supersonic airstream. NASA, Washington, United States, Rep. TN D-6114.

[14]Schlichting H (2000) Boundary-layer theory, eighth edition. Springer, Germany. ISBN: 3540662707.

[15]Gao ZX, Lee CH. (2011) Numerical research on mixing characteristics of different injection schemes for supersonic transverse jet, Science China Technological Sciences, 54:883-893. DOI: 10.1007/s11431-010-4277-9.

[16]Henry JR, Andrews EH, Jr., Pinckney SZ, McClinton CR., (1968) Boundary layer and starting problems on a short axisymmetric scramjet inlet, Compressible Turbulent Boundary Layers, 481-508. NASA SP-216

Е.С. Моисеева¹, А.Ж. Найманова²

¹Өл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан

²Математика және математикалық модельдеу институты ҚР БҒМ, Алматы, Қазақстан

КӨЛДЕНЕҢ ҮРЛЕНЕТІН АҒЫНША МЕН ЖЫЛДАМДЫҒЫ ДЫБЫС ЖЫЛДАМДЫҒЫНАН ЖОҒАРЫ АҒЫСПЕН ӘСЕРЛЕСУ МЕХАНИЗМДЕРІНЕ КІРЕ БЕРІСТЕГІ ШЕКАРАЛЫҚ ҚАБАТТЫҢ ӘСЕРІ

Андатпа. Мәлім жұмыста көлденең үрленетін ағыншасы бар жылдамдығы дыбыс жылдамдығынан жоғары көпкомпонентті газ қоспалары сандық зерттелді. Кіре берісте шекаралық қабаттың құйындар жүйесі мен араласу қабаттарына әсері зерделенді. Ағыншаның алдында пайда болатын қосымша үзілмелі көпжүйелі органың аймағында шекаралық қабаттың қалыңдығының мәні анықталды, ағыншаның алдында жаңа құйындар жүйесі табылды. Шекаралық қабаттың қалыңдығы кішірейген сайын ағыншаның алдындағы кіре берістегі құйындар саны азаятындығы, ал ағыншаның артында қосымша құйындар жүйесі пайда болатындығы көрсетілді. Ағын мен үрленетін ағыншаның араласу процесіне құйындар жүйесінің әсері анықталды.

Тірек сөздер: турбуленттілік, шекаралық қабат, араласу қабаты, жылдамдығы дыбыс жылдамдығынан жоғары ағын, көлденең үрлеу.

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 6, Number 316 (2017), 163 – 170

N.V.Gluschenko, I.D.Gorlachev, A.A.Zheltoy, A.V.Kireev, K.M.Mukshev*, A.V.Platov

Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

*Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

AUTOMATION OF EXPERIMENTATION AT ACCELERATOR UKP-2-1

Abstract. The control system of the electrostatic accelerator UKP-2-1 has been redesigned. As a result, the qualitative characteristics of the beam of accelerated ions have changed significantly. The conditions for carrying out the experiments were simplified. The accelerator setup time has significantly decreased. The accuracy of determining the beam parameters has increased, the probability of emergency situations has sharply decreased. It became possible to carry out experiments with cyclic switching of beam parameters or according to a predetermined program.

Keywords: experiment automation, electrostatic ion accelerator, ion-beam technologies, beam characteristics, beam parameters.

УДК 621.384.6; 001.89.004

Н.В. Глущенко, И.Д. Горлачев, А.А. Желтов,
А.В. Киреев, К.М. Мукашев, А.В. Платов

Институт Ядерной Физики, Алматы, Казахстан;

*Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА УСКОРИТЕЛЕ УКП-2-1

Аннотация. Заново модернизирована система управления электростатическим ускорителем УКП-2-1. В результате существенно изменились качественные характеристики пучка ускоренных ионов. Упростились условия проведения экспериментов. Значительно сократилось время настройки ускорителя. Повысилась точность определения параметров пучка, резко снизилась вероятность аварийных ситуаций. Появилась возможность проведения экспериментов с циклическим переключением параметров пучка или по заранее заданной программе.

Ключевые слова: автоматизация эксперимента, электростатический ускоритель ионов, ионно-пучковые технологии, характеристики пучка, параметры пучка.

Введение. Электростатический ускоритель ионов УКП-2-1, созданный в середине 80-х годов, по ряду своих параметров является лучшим в своем классе на территории СНГ. На протяжении почти трех десятилетий ускоритель был востребованной установкой, на которой регулярно проводились исследовательские и прикладные работы. При этом каждая из этих работ требует индивидуальной настройки ускорителя в соответствии со стоящими перед исследователями задачами. Нередко на ускорителе ведется параллельно несколько разнородных работ, каждая из которых предъявляет свои собственные требования к ионному пучку. Точность выполнения этих требований и воспроизводимость режимов работы установки при повторной настройке определяют качество произведенных исследований, их конкурентоспособность и востребованность. Некоторые виды работ, например ускорительная масс-спектрометрия, требуют многократной перестройки режимов ускорителя по заранее заданной программе, что невозможно

без автоматизированной системы управления. Современная наука предъявляет строгие требования к качеству проведения работ на подобных установках [1-6], поэтому назрела необходимость частичной модернизации ускорителя в части его управления, контроля процессов, происходящих в ускорителе и качества ионного пучка.

Автоматизированная система управления и контроля электростатического ионного ускорителя (АСУУ) предназначена для повышения точности установки параметров ускорителя и получения повторяемости проводимых исследований и измерений, снижения себестоимости работ, повышение надежности и безаварийности установки. Основное назначение АСУУ - это гарантированное соблюдение потребительских характеристик пучка. Автоматизированы следующие процессы, выполняемые на ускорителе: запуск и настройка ускорителя, получение требуемых параметров пучка ионов, поддержание требуемых параметров в процессе работы, переключение режимов работы в случае необходимости, протоколирование и экспорт данных о состоянии ускорителя в процессе работы, предоставление конечным потребителям возможности управления выходными параметрами пучка ионов, калибровка ускорителя.

Схема и принцип работы системы автоматизации. Ускоритель УКП-2-1 выполнен по тандемной схеме с перезарядной мишенью (рисунок 1). Особенностью ускорителя является использование двух каналов ускорения с одним общим источником высокого напряжения. Ускоритель состоит из следующих систем: источник легких ионов, источник тяжелых ионов, канал инжекции тяжелых ионов, каскадный генератор, канал легких ионов, канал тяжелых ионов. Максимальное напряжение на каскадном генераторе типа Кокрофт-Уолтона 1 МВ. В качестве источника легких ионов используется дуоплазматрон, для получения тяжелых ионов используется многокатодный источник ионов с цезиевым распылением.

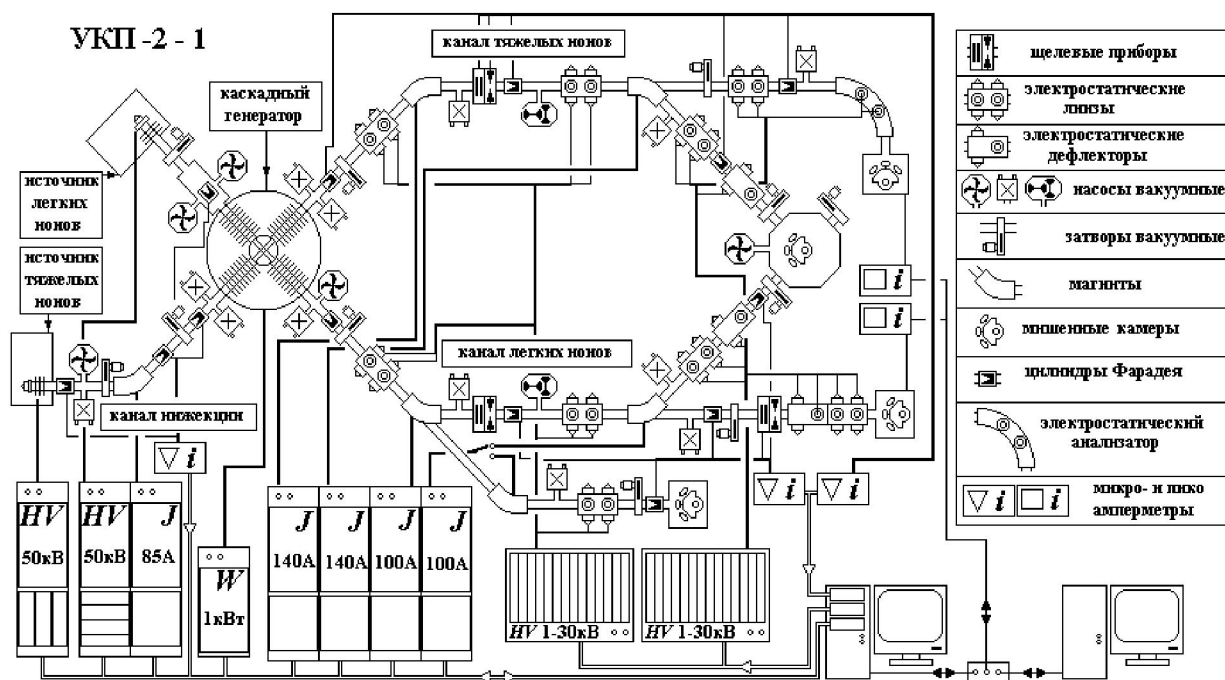


Рисунок 1 – Структура системы автоматизации

Для проведения автоматизации системы управления ускорительного комплекса необходимо было выбрать общую схему и стандарты, в рамках которых будет автоматизироваться установка. В качестве операционной системы для автоматизации была выбрана Windows Microsoft. ОС Windows не является общепринятой системой [1,2] при подобных работах, но выбор в её пользу был сделан для возможности экспорта данных о работе установки в различные программы, работающих в среде Windows и широко используемых для обработки данных и вычислений [6,7]. Использование Windows также избавляет от необходимости дорогостоящего и узкоспециализированного обучения

персонала установки для эффективной работы по обслуживанию и развитию программного обеспечения (ПО) системы автоматизации. Немаловажным фактором является себестоимость разрабатываемого ПО. Для разработки ПО системы автоматизации выбрана среда программирования LabVIEW [7,8] корпорации National Instruments. Предпочтение этой среде программирования отдано по причинам наличия и широкого использования большого количества библиотек, разработанных многими компаниями, кроме того большинство производителей модульных приборов предлагают готовые драйверы для своего оборудования в этой среде.

АСУУ выполнена единой, т.е. все объекты ускорителя управляются с одного рабочего места и имеют возможность программно взаимодействовать друг с другом. В системе использована двухуровневая структура:

- подсистема нижнего уровня предназначена для непосредственного взаимодействия с объектами управления. Она осуществляет выдачу управляющих сигналов, сбор данных о состоянии объектов, коррекцию управляющих сигналов, а также пересчет данных к реальным значениям в международной системе единиц СИ и передачу этих данных к подсистеме верхнего уровня в режиме реального времени без необходимости вмешательства оператора;

- подсистема верхнего уровня предназначена для настройки и управления ускорителем оператором. Она позволяет осуществлять выбор режима работы, загрузку и сохранение определенных режимов, визуализацию состояния ускорителя и прочие функции. Во избежание длительных задержек в процессе передачи данных, в качестве протокола взаимодействия между подсистемами использован протокол UDP.

При выборе общей схемы автоматизации основное внимание уделялось точности установки параметров ускорителя и их повторяемости при повторной настройке. Класс точности ускорителя определяется в первую очередь, точностью установки и поддержания энергии, тока и формы пучка ускоряемых ионов, а также способностью всех узлов ускорителя поддерживать заданный класс точности в процессе работы. Ускоритель имеет паспортную точность по энергии 0,05%. Изначально система управления отдельными узлами установки проектировалась исходя из этой цифры. При этом исполнительные устройства ускорителя, такие как каскадный генератор, высоковольтные источники, система питания магнитов и пр. позволяют получить гораздо более высокую точность – порядка 0,002%. В изначальной схеме настройка аналоговых параметров ускорителя осуществлялась *установкой* опорного напряжения с использованием многооборотных потенциометров или *трансформаторов-вариактов*. При этом величина устанавливаемых параметров (кроме каскадного генератора) контролировалась по *стрелочным* приборам, имеющим точность не лучше 2%. Поэтому было решено заменить электромеханические источники *установки* на стандартные блоки цифро-аналоговых (ЦАП) и аналого-цифровых преобразователей (АЦП), управляемых от компьютера

Аппаратная часть. Для АСУУ используются два 16-канальных 16-разрядных АЦП модели NI6203PCI с паспортной точностью измерения 0,002%. Реально полученная точность измерения порядка 0,005%, что вызвано невысокой частотой выборки для этой модели. Кроме того на платах имеется по два 16-разрядных ЦАП, использованные для каналов управления, в которых требуется высокая разрядность. Для каналов управления, на требующих высокой разрядности, используется 32-канальный 12-разрядный ЦАП модели NI6732PCI с точностью установки 0,025%. Платы выполнены в стандарте PCI и установлены непосредственно в компьютер нижнего уровня, расположенный в пультовом зале ускорителя. Сигналы с плат подаются на кроссовую панель, на которой сведены все управляющие и контрольные сигналы ускорителя. Это позволяет получить доступ ко всем сигналам управления и контроля ускорителя в одном месте при настройке и ремонте системы управления. От кроссовой панели сигналы разводятся непосредственно к управляемым узлам или к местным кроссовым панелям, которых насчитывается 5 шт., установленных в зале ускорителя. Для снижения помех при передаче сигналов, они передаются в 10 В формате по коаксиальным проводам или витой паре. Приведение сигналов управления к необходимому уровню производится в непосредственной близости к объекту управления. Аналогично, контрольные сигналы приводятся к 10 В формату вблизи точки измерения и затем передаются по кабелям к кроссовой панели. Компьютер нижнего уровня соединен с компьютером верхнего уровня через сетевой разветвитель.

Управляющие аналоговые сигналы формируются цифро-аналоговыми преобразователями (ЦАП) в диапазоне 0-10 В и передаются в нормализаторы уровня сигнала (НУС), которые усиливают или ослабляют сигнал до требуемого уровня в конкретном исполнительном устройстве. НУС представляют собой прецизионные помехозащищенные дифференциальные усилители с фиксированным коэффициентом усиления по постоянному току, требуемой амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) и защитой по перегрузке тока и напряжения, как на входе, так и на выходе. Амплитудно-частотная характеристика НУС настраивается таким образом, чтобы обеспечить необходимое быстродействие управления устройством при максимальной помехозащищенности. Особое внимание при изготовлении и настройке НУС уделялось обеспечению стабильности коэффициента усиления и отсутствию дрейфа нуля. Необходимость применения НУС управляющих сигналов вызвана требованием использования всего диапазона ЦАП для сохранения его разрядности. Аналоговый сигнал с НУС используется как референсный схемой управления конкретного исполнительного устройства. Контрольные аналоговые сигналы поступают от различных измерительных устройств ускорителя и изначально имеют различные диапазоны значений (в Вольтах) и полярность. Для приведения этих сигналов к единому диапазону значений, были также изготовлены НУС, которые позволяют использовать многоканальные аналогово-цифровые преобразователи (АЦП), работающие в едином диапазоне напряжений (0-10 В). Дифференциальный вход НУС необходим для устранения помехи, вносимой контуром общего заземления. Наличие на ускорителе большого количества источников постоянного тока и напряжения, подключенных к общему контуру заземления, приводит к смещению потенциала земли в различных точках ускорителя из-за сопротивления контура заземления. Причем это смещение может меняться при изменении режимов работы ускорителя. Поэтому для заземления сигнала НУС по стороне ЦАП и АЦП используется точка заземления, расположенная рядом с платами управления. Заземление НУС по стороне референсного сигнала производится в точке расположения управляемого устройства. Кроме того, для подавления эффекта наложения частот в измерительные цепи внесены RC фильтры, отсекающие помехи на частотах больших частоты выборки по каждому каналу.

Программное обеспечение нижнего уровня. Измерения контролируемых величин производится при помощи многоканальных АЦП, частота выборки по каждому каналу составляет 1 кГц. Измерение производится непрерывно, и данные помещаются в промежуточный массив данных. Программа обработки, установленная на компьютере нижнего уровня, работает в циклическом режиме и периодически выбирает накопленный массив данных. Время выполнения цикла программы фиксированное и обычно равно 20 мс, но если во время выполнения цикла возникли какие-либо задержки, связанные со служебными программами компьютера или обращением к памяти, то это время кратно 20 мс. Время исполнения цикла в 20 мс выбрано для полного подавления помех 50 Гц от электрической сети, дающих основной вклад в наводки, присутствующих в цепях измерений. За время выполнения цикла накапливается 20 единичных измерений, которые усредняются, что позволяет снизить шумы, не кратные 50 Гц, присутствующие в цепях измерения в 4 раза. Присутствие во входном аналоговом сигнале случайного шума небольшой амплитуды, порядка 1-2 минимально значимых разрядов (МЗР), позволяет получить разрешение лучше, чем МЗР, за счет того что среднее значение за период усреднения может принимать промежуточные значения между соседними целыми, полученными от АЦП.

Большинство устройств ускорителя требует наличия управляемой астатической обратной связи, замкнутой через компьютер. Это требование вызвано нестабильностью коэффициентов передачи между управляющими сигналами, выдаваемыми компьютером через ЦАП и истинными значениями установленных параметров. Эти нестабильности коэффициентов могут иметь непрогнозируемый и плохо контролируемый характер, например, нагрев обмоток магнитов, изменение давления изолирующего газа в каскадном генераторе. На требуемом уровне точности настройки влияние может даже оказать изменение напряжения электрической сети. В то же время, точность измерения всех контрольных цепей достаточна для обеспечения заданной точности. Внесение астатической обратной связи позволяет осуществлять автоматическую подстройку управляющего сигнала для получения требуемого значения параметра на выходе исполнительного

устройства, контролируемого через измерительную цепь. Была разработана программная процедура пропорционального интегрального регулятора (ПИР) с изменяемыми для различных режимов параметрами регулирования. В процедуру добавлены дополнительные функции, необходимые для управления объектом. Во-первых, это ограничитель скорости роста управляемого параметра. При быстром изменении большинства параметров как высоковольтных, так и высокотоковых возникают перегрузки в исполнительных устройствах, связанные с реактивной составляющей нагрузки, а также, при наличии аппаратной обратной связи в устройстве, происходит перерегулирование объекта. Введены программные ограничители скорости роста уставки, а также во время роста и спуска управляемого параметра блокируется интегрирование в ПИР. При больших рассогласованиях требуемого и реального значения параметра, рост уставки блокируется до тех пор, пока реальное значение не приблизится к требуемому значению. Для устранения эффекта мерцания введено окно нечувствительности шириной в один МЗР, в пределах которого интегрирование ПИР блокируется.

Все управляющие и контрольные сигналы, используемые в аналоговых цепях, на стадии цифроаналогового преобразования лежат в диапазоне ± 10 В. Для управления используется диапазон $0 - +10$ В, но НУС используют биполярный сигнал на входе и выходе, для сохранения линейности в районе «0». Для каждого конкретного устройства этот 10 В диапазон соответствует полному диапазону изменения управляемого или измеряемого параметра. Такие исполнительные устройства как каскадный генератор, электромагниты и высоковольтное питание источников ионов имеют нелинейную зависимость выходного параметра от референсного сигнала и соответственно сигнала, выдаваемого ЦАП, поэтому была произведена калибровка каждого исполнительного устройства по управляющему сигналу и построены калибровочные кривые управления этими устройствами. Полученные кривые программно гладко интерполированы между калибровочными точками. Для устройств, имеющих линейный отклик, измерены коэффициенты связи и смещения между референсным сигналом и управляемым параметром. Эти кривые и коэффициенты внесены в компьютерные процедуры управления и используются ими при установке требуемого значения параметра. Аналогичная калибровка была сделана для контрольных сигналов, получаемых от измерительных устройств ускорителя. Использование калибровочных кривых и коэффициентов в цепи управления позволяет минимизировать пропорциональный член в ПИР, что повышает устойчивость его работы, а также ограничить диапазон регулирования интегрального члена ПИР.

Программы компьютеров верхнего и нижнего уровня используют разные форматы данных в своей работе. Программа компьютера нижнего уровня использует данные в 10 В формате. Это сделано для унификации процедур, работающих с различными устройствами. При этом для процедур, которые используют данные измерений, усреднение производится за время всего цикла. Если это необходимо для процедуры, использующей эти данные, то производится нормировка на истинное время цикла. Это сделано для максимально быстрого отклика системы при работе в режиме реального времени. Приведение данных измерений к реальным значениям на компьютере нижнего уровня производится только для их визуализации на мониторе, а также передачи на компьютер верхнего уровня. Данные, передаваемые компьютеру верхнего уровня, группируются по 20 последовательных измерений, усредняются, пересчитываются к реальным значениям и передаются по UDP протоколу. Протокол UDP не требует подтверждения получения от компьютера-адресата, поэтому задержки в выполнении программ на обоих компьютерах не происходит. Аналогично, команды управления, подаваемые с компьютера верхнего уровня, представлены в реальных величинах и после получения их компьютером нижнего уровня, пересчитываются к 10 В формату с использованием калибровочных кривых и коэффициентов.

Программное обеспечение верхнего уровня. Компьютер верхнего уровня работает с данными, представленными только в реальных значениях. Это позволяет не вносить корректировок в программу управления ускорителем при изменении калибровочных кривых и коэффициентов, которые использует только компьютер нижнего уровня. Конфигурации настроек для каждого вида работ записываются в отдельные файлы и могут создаваться как «с нуля», так и копированием с последующей модификацией уже существующих конфигураций. Интерфейс программы разбит на два поля: одно общее для всех режимов работы, а второе выполнено в виде

переключаемых закладок, которые позволяют оператору выбрать и выполнить необходимые действия с одной из подсистем (рисунок 2).

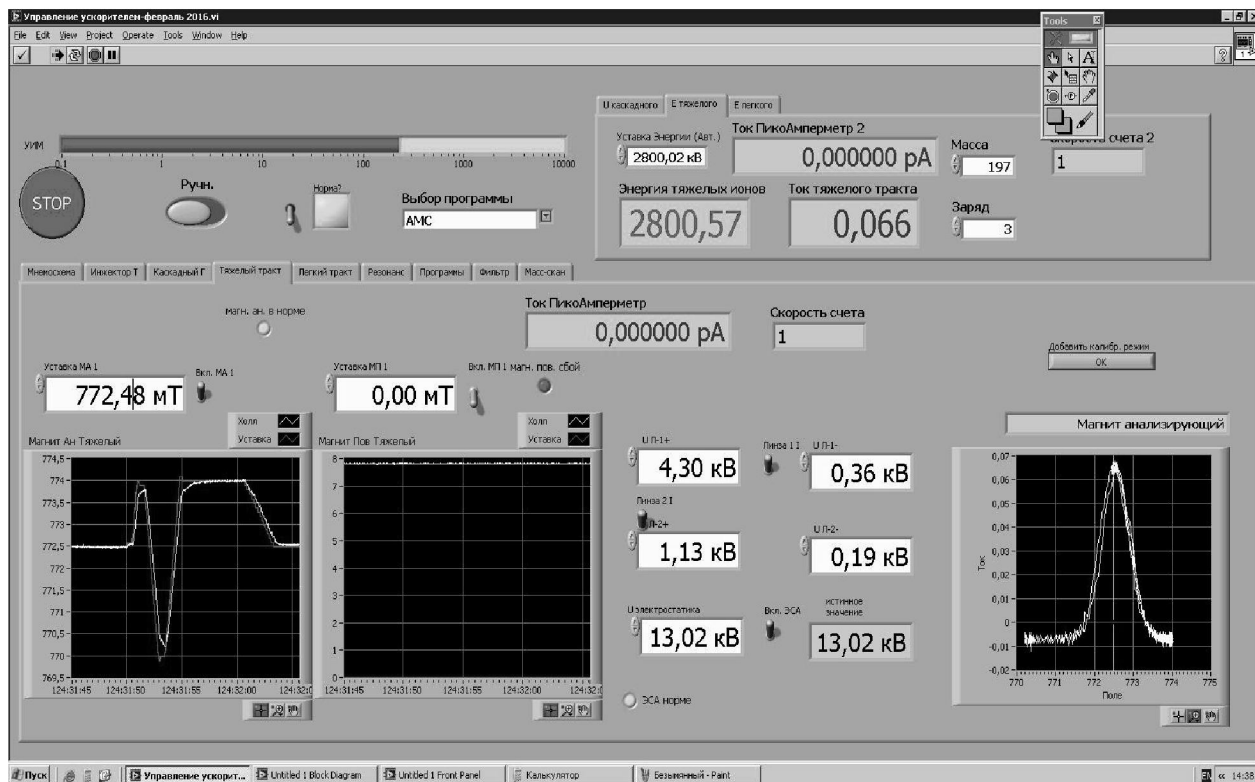


Рисунок 2 - Рабочее окно программы оператора

При настройке и смене режимов работы ускорителя, параметры узлов ускорителя должны изменяться в соответствии с изменившимися условиями работы. Одна из целей построения системы автоматизации – это возможность работы по конечным параметрам, при которой оператор задаёт конечную станцию, в которой происходит работа, выбирает массу и заряд ускоряемых ионов и их энергию, а система управления сама вычисляет и устанавливает необходимые параметры узлов и устройств. Для выполнения этой задачи была разработана подпрограмма, осуществляющая вычисление параметров узлов ускорителя. Следует отметить, что траектория пучка ионов определяется двумя параметрами:

$$\text{магнитной: } Br = \frac{\sqrt{2m\varepsilon}}{q} \quad \text{и электростатической: } Er = \frac{2\varepsilon}{q} \quad \text{жёсткостью,}$$

где m – масса иона, ε – его энергия, а $q = ne$ – заряд.

Независимо от типа ионов, пучки с одинаковой магнитной (электростатической) жёсткостью в магнитных (электрических) полях будут двигаться по одинаковым траекториям. Поэтому ионнооптические элементы тракта разбиты на две группы – магнитные и электростатические элементы, каждый из которых управляется по соответствующей жёсткости. При работе с тяжёлыми ионами, оператор с управляющего компьютера вводит требуемую массу иона, массу молекулярного остатка, (если его нет, то по умолчанию «0»), заряд и энергию, при работе с легкими – вводит тип иона и его энергию. Программа управления рассчитывает необходимое напряжение на каскадном генераторе, высчитывает жёсткости пучка и, исходя из них, требуемые значения параметров узлов. Использование жёсткостей в качестве аргумента калибровочных зависимостей позволяет производить настройку ускорителя на ионах с хорошими токами и использовать параметры этой настройки для других, менее интенсивных ионных пучков. Попытка использовать расчетные параметры на основе теоретических моделей ионнооптических элементов показала, что теоретические значения не совпадают точно с реальными значениями при условии

оптимальной настройки ускорителя, поэтому были построены экспериментальные зависимости оптимальных значений параметров от жесткости пучка для каждого ионнооптического элемента.

Для вычисления напряжения каскадного генератора используются следующие расчетные формулы:

для легких ионов: $U_{cg} = (\mathcal{E} - U_{src})/2$, для тяжелых ионов: $U_{cg} = (\mathcal{E} - U_{src}) / (\frac{m}{m+m_{mr}} + \frac{q}{e})$,

где U_{cg} – напряжение каскадного генератора, U_{src} – напряжение на соответствующем ионном источнике, m_{mr} – масса молекулярного остатка.

Последующие испытания этой подпрограммы показали, что она дает удовлетворительные результаты, то есть при начале работы, перенастройке энергии или изменении массы ионов пучок автоматически занимает траекторию оптимальной трансмиссии и не требует дополнительной ручной подстройки.

Заключение. Для оценки эффективности проведенных мероприятий были проведены сравнительные испытания созданной системы автоматического управления. Сравнивались как параметры отдельных узлов, так и работа всего ускорителя в целом. Испытания высоковольтных блоков питания ионных источников показали, что новая система управления обладает неоспоримыми преимуществами по сравнению с ранее использовавшейся. Время настройки источников ионов снизилось с 40 мин. до 1-2 мин. Повторяемость между различными сеансами работы в пределах 5 В для тяжелого тракта и 10 В для легкого по сравнению с 200 В по старой схеме. Испытания магнитов производились при разных значениях магнитного поля на предмет точности установки, его кратковременной и долговременной стабильности, скорости установки требуемого значения магнитного поля, независимости от влияния остаточной намагниченности и от предыдущих установок при циклических переключениях. Результаты испытаний показали сокращение времени настройки в 20-30 раз. Повторяемость и стабильность поля магнитов тяжелого тракта 0,05 мТл, легкого – 0,1 мТл, по сравнению с 0,5 мТл при ручном управлении. Испытания каскадного генератора показали сокращение времени настройки с «0» до требуемого значения с 1 часа до 5 мин. Стабильность высокого напряжения улучшилась с 200 В до 40 В. Время настройки электростатических элементов снизилось с 2-5 мин. до 1 сек. Были проведены сравнительные испытания времени настройки при ручном и автоматическом режимах работы ускорителя в целом, которые показали сокращение непроизводительных затрат ускорительного времени в 5-20 раз в зависимости от вида проводимых работ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Nikiforov, V. Aleinikov, A. Sychev, I. Borina, A. Rukavishnikov. «Experience in using FlexCtrl SCADA for accelerator automation». Physics of Particles and Nuclei Letters. July 2012, Volume 9, Issue 4-5, pp 417-421.
- [2] Kantsyrev V., Bakhmutova A. V., Golubev A. A., Demidov V. S., Demidova E. V., Ladygina E. M., Markov N. V., Smirnov G. N., Turtikov V. I., Fertman A. D., Shestov L. M., Khudomyasov A. V. «An integrated automation system for experiments on the fast extraction beamline of the TWAC-ITEP accelerator-accumulator facility» Instruments and Experimental Techniques, September 2010, Volume 53, Issue 5, pp 663-674.
- [3] Mirandaa P. A., Chestaa M. A., Cancinoa S. A., Moralesa J. R., Dinatora M. I., Wachtera J. A. and Tenreirob C. «Recent IBA setup improvements in Chile», Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B248, (2006) 150-154.
- [4] Бублей А.В., Гончаров А.Д., Малыгин А.Н., Матюшин Г.Г., Останин В.П., Сухина Б.Н., Туликов В.С., Чумаков С.Н. «Системы управления для ионных имплантеров», труды XIV конференции по ускорителям заряженных частиц, Протвино, Россия, 1994.
- [5] Langerak J.J., De Haas A.P., Kronenburg M., Smit W., Verwelst B., Van Der Borg K. «Automation of AMS measurements in Utrecht» Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B29 (1987) 94-96.
- [6] Грехов О.В., Другаков А.Н., Киселев Ю.В. Система управления линейным ускорителем ИЯИ РАН. Problems of atomic science and technology. 2008. № 3. Series: Nuclear Physics Investigations (49), p.64-67.
- [7] José Lopes, Francisco André Corrêa Alegria and Luís Redondo, «Automation of a Particle Accelerator Operation Using LabVIEW». Proceedings of the World Congress on Engineering 2008 Vol I, WCE 2008, July 2 - 4, 2008, London, U.K.
- [8] Бутырин П. А., Васильковская Т. А., Каратаев В. В., Материнкин С. В. «Автоматизация физических исследований и эксперимента компьютерные измерения и виртуальные приборы на основе LabVIEW 7». ДМК пресс. 2005.

Н.В. Глущенко, И.Д. Горлачев, А.А. Желтов, А.В. Киреев, Қ.М. Мұқашев*, А.В. Платов

Ядролық физика институты. Алматы қ., Қазақстан;
*Әл-Фараби ат-ы Қазақ Ұлттық университеті. Алматы қ., Қазақстан

**УКП-2-1 ҮДЕТКІШІМЕН ЖҮРГІЗІЛЕТІН ФИЗИКАЛЫҚ
ЭКСПЕРИМЕНТТЕРДІ ОРЫНДАУДЫ АВТОМАТТАНДЫРУ**

Аннотация. Электростатикалық УКП-2-1 үдеткішінің басқару жүйесі толығымен жаңартылды. Нәтижесінде үдетілген иондар шоғырының сапалық көрсеткіштері түбегейлі өзгеріске ұшырады. Эксперименттерді орындау мүмкіндігі жетілдірілді. Үдеткішті жұмысшы режимге шығару мерзімі біршама қысқарды. Иондар шоғырының параметрлерін анықтау дәлдігі арттырылып, апаттық жағдаяттардың ықтималдығы күрт төмендеді. Экспериментті иондар шоғырының параметрлерін циклдік режимге көшіру арқылы немесе алдын-ала жобаланған программа бойынша орындау мүмкіндігі туды.

Тірек сөздер: экспериментті автоматтандыру, иондардың электростатикалық үдеткіші, иондық шоғырлар технологиясы, шоғыр көрсеткіштері, шоғыр сипаттары.

Сведения об авторах:

Глущенко Н.В. - начальник службы, Институт Ядерной Физики, Алматы, Казахстан. моб. +7(777)2181748. e-mail: gluchshenko.nikolay@gmail.com.

Горлачев И.Д. - к.ф.-м.н., начальник группы, Институт Ядерной Физики, Алматы, Казахстан. моб. +7(777)5951441, e-mail: igor.gorlachev@gmail.com.

Желтов А.А. - начальник службы, Институт Ядерной Физики, Алматы, Казахстан. моб. +7(777)2720893. e-mail: zh_aa@mail.ru.

Киреев А.В.- начальник установки, Институт Ядерной Физики, Алматы, Казахстан. моб. +7(777)2447020. e-mail: kireyev.aleks@gmail.ru.

Мұқашев Қ.М.- д.ф.-м.н., профессор, КазНУ им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан. моб.8-7013739283. e-mail: kanat-kms@mail.ru.

Платов А.В.- старший научный сотрудник, Институт Ядерной Физики, Алматы, Казахстан. моб. +7(705)2196050. e-mail: platov@inp.kz.