

УДК: 681.327+656.34-523

Ли Вэй, С. В. Зинченко, В. П. Зинченко

УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

Введение

Актуальной проблемой обеспечения соответствия условий экспериментальных исследований в аэродинамической трубе (АДТ) натурным условиям является поддержка параметров потока в режиме реального времени (РВ) [1] - [4], где необходимо обеспечить: требуемый скоростной напора (Q_∞) и скорость (V_∞) с заданной точностью; их изменение как функций времени; закон перехода от текущих значений к заданным [6] - [9].

Предложен алгоритм программного управления потоком в режиме РВ на основе математической модели, в которой АДТ заменяется “эквивалентной” трубой круглого сечения с реальным коэффициентом гидродинамического сопротивления в предположении, что поток происходит в горизонтальной плоскости, несжимаем, изотермический, без учета объемных сил. Обмен данными между параллельно выполняемыми модулями прикладного программного обеспечения (ПО) реализован через общую область памяти двух компьютеров. Один компьютер осуществляет регулирование, а другой - управляет экспериментом, что обеспечивает соответствие экспериментальных и натуральных условий, требуемая точность и информативность.

Постановка задачи

В дозвуковой АДТ энергетическая установка (компрессор, вентилятор, т.п.) создает поток воздуха ($0.1 \leq M_\infty \leq 0.4$), в который помещаются модель объекта и выполняются экспериментальные исследования [6] - [9].

Математическая модель движение воздуха в АДТ должна учитывать состояние потока (турбулентный/ ламинарный), геометрию и качество поверхности элементов АДТ, а также динамику энергетической установки.

Требуется разработать алгоритм для поддержки (управления потоком): заданного скоростного напора (Q_∞) и скорости (V_∞) с точностью не хуже 0.15%; их изменения как функций времени; закона перехода от текущих значений к заданным.

Математическая модель

В [3] – [9] показано, что турбулентное движения ($10^5 \leq Re \leq 2 \cdot 10^7$, $Re_{кр} \approx 2300$) вязкого несжимаемого газа в АДТ ($\rho = const$, $T = const$, $F \neq 0$), описывается уравнением Стокса [5, 11]:

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \cdot \nabla) \cdot \bar{V} = -\frac{1}{\rho} grad p + \gamma \nabla^2 \bar{V} \quad (1)$$

и уравнением неразрывности:

$$div \bar{V} = 0. \quad (2)$$

Единственность решения обеспечивается заданием граничных и начальных условий:

$$V_{|s} = 0. \quad (3)$$

$$V_{|t=0} = \Phi(x, y, z, t = 0). \quad (4)$$

Перепад давления Δp , создаваемый энергетической установкой, расходуется на преодоление гидравлического сопротивления, обусловленного силами сопротивления и трения. Необходимое значение Δp для заданного Q_∞ и V_∞ определяется из решения задачи стационарного движения газа, где уравнение (1) используется в виде:

$$(\bar{V} \cdot \nabla) \cdot \bar{V} = -\frac{1}{\rho} grad p + \gamma \nabla^2 \bar{V}, \quad (5)$$

для которого (3) остается без изменений, а (4) уничтожается.

Общий закон сопротивления для АДТ имеет такой вид [6]

$$\Delta p = |grad p| = \xi_\infty \frac{\rho}{2} |\bar{V}_\infty|^2 = \sum_{i=1}^n \left\{ \xi_{ti} \left(\frac{F_\infty}{F_i} \right)^2 + \xi_{mi} \left(\frac{F_\infty}{F_i} \right)^2 \right\}. \quad (6)$$

где ξ_∞ , ξ_{ti} , ξ_{mi} – коэффициенты гидравлического сопротивления АДТ, сопротивления трения и местного сопротивления элементов АДТ соответственно; F_∞ , F_i – площадь рабочей части и характерных сечений; n – количество элементов АДТ; $i=1, 2, \dots, n$.

Метод и алгоритм определения коэффициентов сопротивления трения и местных сил приведен в [5] – [9]. Сопротивление модели объекта, энергетической установки и т.п. измеряется и определяется в режиме РВ экспериментальных исследований так [5], [9]:

$$\xi_m = c_x \frac{S_m}{F_\infty} \left(1 - \frac{S_m}{F_\infty} \right)^{-3}, \quad (7)$$

где $c_x = f(\alpha, \beta, Re, \dots)$ – измеряемый в РВ коэффициент сопротивления модели объекта; S_m , F_∞ – площади миделевого и нормального сечений модели и рабочей части АДТ соответственно.

Вычисляется ξ_∞ (6) из трансцендентных уравнений [5] методом Dekker T. I. /Brent R.P., который обеспечивает асимптотическую сходимость решения в режиме РВ.

Уравнение (1) нестационарного осесимметричного движения газа [5], [9] в цилиндрической системе координат используется в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial w}{\partial t} - \gamma \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} \right) = f(t), & \text{а)} \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = f(t), & \text{б)} \end{cases} \quad (8)$$

с граничным $w|_s = 0$ и начальным условием

$$w|_{t=0} = \phi(r)|_{t=0} = w(r, t=0) = \frac{a^2 \Delta p}{\mu L} \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right) \quad [3], \quad [4], \quad \text{где: } f(t) = \frac{\Delta p}{\rho L} \psi(t),$$

$\psi(t)$ – функция динамики энергетической установки; $\Delta p/L$ – перепад давления на длине L ; $0 \leq t \leq T$; $0 \leq r \leq a$.

Решение (8) получено методом разделения переменных в виде [5] - [9], [10], [11]:

$$w(r, t) = \Theta(r, t) + \Omega(r, t),$$

где: $\Theta(r, t)$ – вынужденное движения от изменения градиента давления при условии отсутствия начального движения; $\Omega(r, t)$ – изменение движения, вызванное начальным состоянием.

Значение скорости определяется так [5]:

$$w(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{B_n} \left[1 - \frac{I_0 \left(r \sqrt{\frac{B_n}{\gamma}} \right)}{I_0 \left(a \sqrt{\frac{B_n}{\gamma}} \right)} \right] \sin \frac{\pi n}{T} t + a_n J_0 \left(\frac{\mu_n r}{a} \right) e^{-\gamma \left(\frac{\mu_n}{a} \right)^2 t}, \quad (9)$$

где $B_n = \left(\frac{\pi n}{T} \right) \cos \frac{\pi n}{T} t$, $A_n = \frac{2}{T} \int f(\zeta) \sin \frac{\pi n}{T} \zeta d\zeta$, $J_0(\mu_n) = 0$, $n=1, 2, \dots, \infty$,

$$a_n = \frac{2}{a^2 J_1^2(\mu_n)} \int_0^a w(r, t=0) \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right) r J_0 \left(\frac{\mu_n r}{a} \right) dr = w(r, t=0) \left\{ \frac{2(1-a^2)}{\mu_n J_1(\mu_n)} + \frac{4J_2(\mu_n)}{\mu_n^2 J_1(\mu_n)} \right\}.$$

Выражение для определения расхода $Q(t)$ имеет вид:

$$Q(t) = 2\pi \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{A_n}{B_n} \left[\frac{a^2}{2} - a \sqrt{\frac{\gamma}{B_n}} \frac{I_1 \left(a \sqrt{\frac{B_n}{\gamma}} \right)}{I_0 \left(a \sqrt{\frac{B_n}{\gamma}} \right)} \right] \sin \frac{\pi n}{T} t + a_n e^{-\gamma \left(\frac{\mu_n}{a} \right)^2 t} \frac{a^2}{\mu_n} J_1(\mu_n) \right\} \quad (10)$$

При решении прикладных задач (1) граничные $\bar{w}(\bar{r}=1, \bar{t})=0$ и начальные условия $\bar{w}(\bar{r}, \bar{t}=0)=\varepsilon(1-\bar{r})$ для "эквивалентной" АДТ используются в виде:

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{t}} - \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \bar{t}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{r}} \right) = 4(1 - \varepsilon) f\left(\frac{a^2}{\gamma} \bar{t}\right), \varepsilon = \left(\frac{\xi_{\alpha k}}{\xi_{\alpha n}} \right) \left(\frac{\bar{w}_{\alpha k}}{\bar{w}_{\alpha n}} \right)^2,$$

где: $\xi_{\alpha n}, \xi_{\alpha k}, w_{\alpha n}, w_{\alpha k}$ – коэффициенты соотношений гидродинамического сопротивления и скорости в начале и в конце управления; $f(a^2/\gamma)$ – динамика энергетической установки.

В предположении о возможном разложении $f(a^2/\gamma)$ в ряд Фурье на $[0, T]$ (T – время наблюдения) скорость и объемный расход определяются по таким формулам:

$$\bar{w}(\bar{r}, \bar{t}) = 8\varepsilon \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\lambda_n \bar{r})}{\lambda_n^3 J_1(\lambda_n)} e^{\lambda_n^2 \bar{t}} + 4(1 - \varepsilon) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{B_n} \left[1 - \frac{I_0(\bar{r} \sqrt{B_n})}{(\sqrt{B_n})} \right] \sin\left(\frac{\pi n}{\bar{T}} \bar{t}\right), \quad (11)$$

$$\bar{Q}(\bar{t}) = 32\varepsilon \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{\lambda_n^2 \bar{t}}}{\lambda_n^4} + 8(1 - \varepsilon) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{B_n} \left[1 - \frac{2}{\sqrt{B_n}} \frac{I_1(\sqrt{B_n})}{I_0(\sqrt{B_n})} \right] \sin\left(\frac{\pi n}{\bar{T}} \bar{t}\right), \quad (12)$$

где $B_n = \left(\frac{\bar{T}}{\pi n} \right) \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi n}{\bar{T}} \bar{t}\right)$; $J_0(\lambda_n) = 0, n = 1, 2, \dots, \infty$; $A_n = \frac{2}{\bar{T}} \int_0^{\bar{T}} f(\theta) \sin\left(\frac{\pi n}{\bar{T}} \theta\right) d\theta$.

Практические случаи рассмотрены в [3], [9], [10].

Алгоритм управления

Предложена система управления потоком дозвуковой АДТ, структурная схема которой показана на рис. 1 [11], где: K_1, K_2 – базовый и управляющий компьютеры соответственно; УСО – устройство связи с объектом (для сопряжения K_1 и K_2 с агрегатами АДТ); БУ – блок управления тиристорным электроприводом (ТП), ЭП – энергетическая установка, ТГ – тахогенератор, ДД – датчик давления; ДС – датчик сопротивления модели объекта.

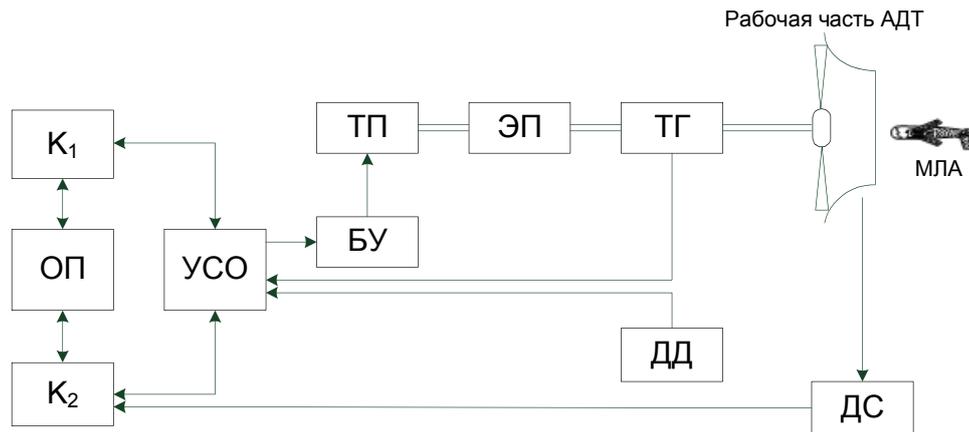


Рис. 1. Структурная схема системы управления

Собственно K_2 совместно с УСО обеспечивает управление потоком. Взаимодействие K_1 и K_2 осуществляется через общую область памяти, что позволяет параллельно выполнять прикладное ПО на K_1 и K_2 , работающих под управлением операционных систем РВ (ОС РВ). Внутренняя обратная связь системы управления регулирует параметры энергетической установки (например, обороты), а внешняя - по значению $Q_\infty(t)$.

Функциональная схема системы управления потоком показана на рис. 2, где K_1 работает в режиме РВ эксперимента.

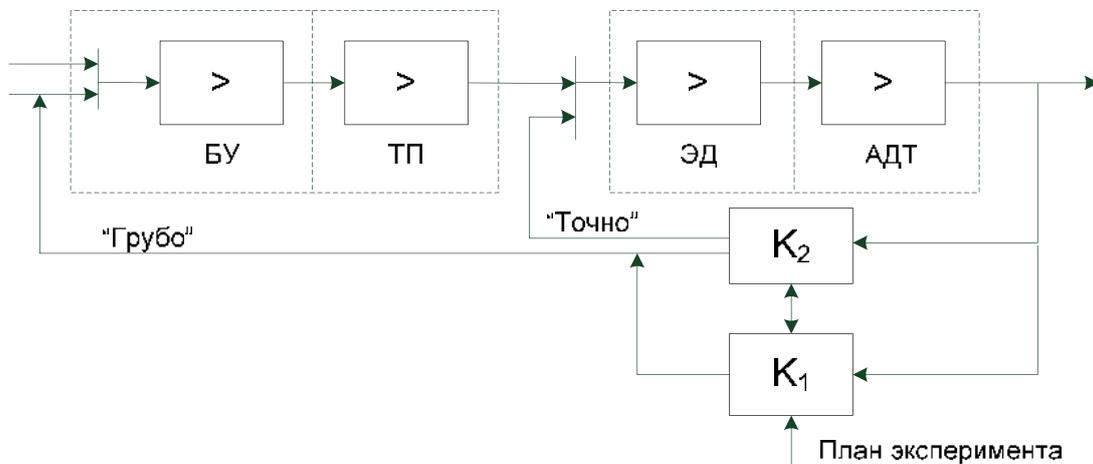


Рис. 2. Функциональная схема системы управления

В момент необходимого регулирования $Q_\infty(t)$, K_1 формирует задание для K_2 на выполнение одной из таких задач: поддержка требуемого Q_∞ и V_∞ с заданной точностью; их изменения как функций времени; закона перехода от текущих значений к заданным. По-другому, K_2 осуществляет грубое (выход в заданную область) и точное (поддержка значений параметров) регулирование, а K_1 – управляет экспериментом.

Алгоритм управления потоком соответствует следующей процедуре.

Шаг 1. Выбрать опыт из «Плана эксперимента» и поместить параметры в общую область памяти K_2 и K_1 .

Шаг 2. Задать V_∞ и интервала наблюдения $[0, T]$ (длительность опыта).

Шаг 3. Определить Δp (алгоритм приведен ниже) [3].

Шаг 4. Вычислить и записать значения $w(r, t)$ (9), $Q(t)$ (10) на $t \in [0, T]$ в общую область памяти.

Шаг 5. Параллельно выполнить:

а) регулирование потока K_2 :

Шаг 5а_1. Ожидание: если выполнять опыт, то перейти на Шаг 5а_2; иначе на Шаг 7.

Шаг 5а_2. Прочитать параметры и выбрать стратегию управления.

Шаг 5а_3. Решить задачу регулирования.

Шаг 5а_4. Задать режим управления и поддерживать параметры потока в допустимых пределах (измерять и передавать параметры в общую область памяти) на $t \in [0, T]$.

Шаг 5а_5. Передать данные опыта в общую область памяти, перейти на Шаг 5а_1.

б) управление экспериментом K_1 :

Шаг 5б_1. Ожидать выполнения условий опыта на $t \in 2x[0, T]$. Если они выполнены, то перейти на Шаг 5б_2, иначе перейти на Шаг 5.

Шаг 5б_2. Считать с общей область памяти данные опыта, их обработать, визуализировать и записать.

Шаг 6. Если «Плана эксперимента» выполнен, то перейти на Шаг 7, иначе на Шаг 1.

Шаг 7. Конец.

Решение стационарной задачи (определение Δp) отвечает такой процедуре [3].

Шаг 1. Задать скорость V_∞ и извлечь из БД параметры элементов АДТ.

Шаг 2. Вычислить: площади (F_i), периметры (P_i); гидравлические радиусы (r_{0i}) и шероховатости (k_i).

Шаг 3. Вычислить V_i и Re_i в сечениях АДТ.

Шаг 4. Вычислить коэффициенты трения $\lambda_i = f(k_i, Re_i)$ и ξ_{ti} с учетом поворота, расширения/сужения и нелинейности потока.

Шаг 5. Вычислить местный коэффициент сопротивления ξ_{mi} .

Шаг 6. Определить общий коэффициент сопротивления элементов АДТ ξ_i с учетом дополнительных местных потерь.

Шаг 7. Определить ξ_∞ (7).

Шаг 8. Конец.

Прикладное ПО управления потоком дозвуковой АДТ предложено реализовать на двух уровнях: формирование задания на управление, выполнение собственно управления. Взаимодействие между модулями прикладного ПО осуществляется через общую область памяти, как показано на рис. 3. Собственно алгоритм программного управления

потоком - это участок а) алгоритма. Отметим, что данный алгоритм является оптимальным (относительно задач) по: быстродействию; точности обработки и поддержки параметров.

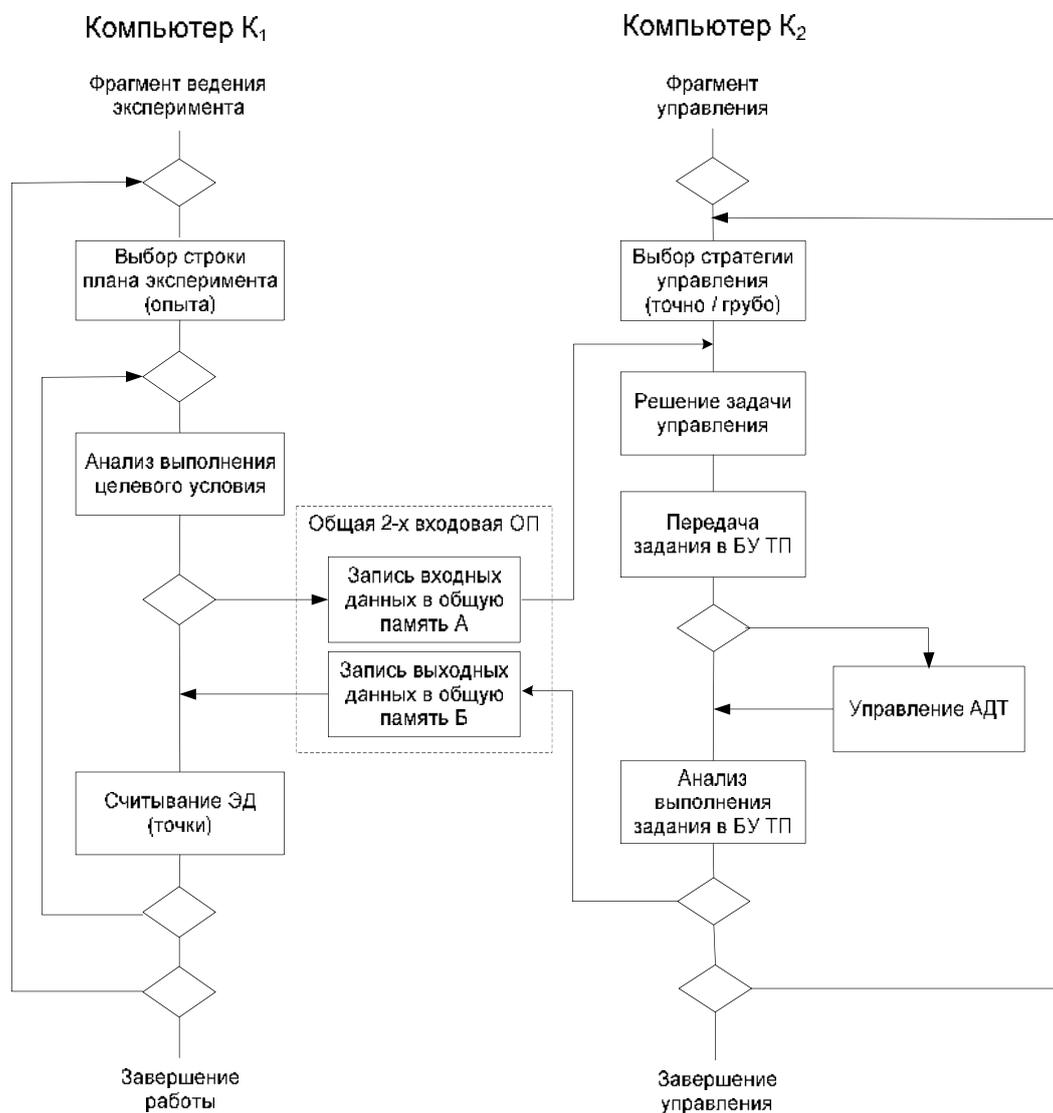


Рис. 3. Алгоритм программного управления потоком

Реализация алгоритма возможна при использовании соответствующего аппаратного и программного обеспечения [12], [13]. В частности, предложено использовать ОС РВ QNX, Linux на первом и W'CE на втором уровнях системы. Загрузка ОС РВ в K₂ осуществляется с K₁ совместно с прикладным ПО.

Выводы

В работе предложен алгоритм программного управления потоком в режиме РВ на основе математической модели, в которой АДТ заменяется "эквивалентной" трубой круглого сечения с реальным коэффициентом

гидродинамического сопротивления в предположении, что поток происходит в горизонтальной плоскости, несжимаем, изотермический, без учета объемных сил.

Обмен данными между параллельно выполняемыми модулями прикладного программного обеспечения (ПО) реализован через общую область памяти двух компьютеров. Один компьютер осуществляет регулирование, а другой – управляет экспериментом, что обеспечивает соответствие экспериментальных и натуральных условий, требуемая точность и информативность.

В дальнейшем будут исследованы средства и методы обеспечения эксперимента в РВ.

Список использованной литературы

1. *Зинченко В. П.* Автоматизация экспериментальных исследований в аэродинамической трубе // В. П. Зинченко / УСиМ. - 1989. - № 1.- С. 95 - 99.
2. Системы автоматизации экспериментальных исследований в аэродинамических трубах / В. М. Египко, В. П. Зинченко, Б. Н. Белоусов, Ф. Н. Горин. - К.: Наукова думка, 1992. - 264 с.
3. *Зинченко В. П.* Інформаційна технологія проектних досліджень // В. П. Зинченко / Міжнар. конгрес “Інформаційне суспільство в Україні - стан проблеми, перспективи”. - К.: НТУУ “КПІ”, 2000. - С. 218 - 230.
4. *Зинченко В. П.* Інформаційна технологія проектних досліджень складних технічних об’єктів // В. П. Зинченко / Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2000. - № 4. – С. 32 - 42.
5. Зинченко В. П., Египко В. М. Метод моделирования динамических процессов в аэродинамических трубах малых дозвуковых скоростей // В. П. Зинченко, В. М. Египко/ К., 1996. – 19 с. (Преп./ НАН Укрини Ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова; 96 - 13).
6. *Зинченко В. П.* Решение задачи движения газа в дозвуковой аэродинамической трубе методом разделяемых переменных // В. П. Зинченко, С. В. Зинченко / VI Міжнарод. наук. конф. ім. акад. М. Кравчука: Зб. доп. - К.: НТУУ "КПІ", 1997. - С. 180.
7. *Зинченко В. П.* Моделирование переходных процессов в аэродинамической трубе // В. П. Зинченко, С. В. Зинченко, Ф. Н. Горин, И. П. Муха / Технології розподілених обчислень в імітаційному моделюванні. - К.: НАН України Ін-т кібернетики ім. В. М. Глушкова, 2001. - С. 92 – 98.

8. *Зинченко В. П.* Модель стационарного движения газа в аэродинамической трубе // В. П. Зинченко/ Інформаційні системи, механіка та керування, 2008. Вып. 1. - С. 76 – 88.
9. *Зинченко В. П.* Модель потока газа в дозвуковой аэродинамической трубе // В. П. Зинченко / Інформаційні системи, механіка та керування, 2009. Вып. 2. - С. 33 – 40.
10. *Горлин С. М.* Аэромеханические измерения // С. М. Горлин, Н. М. Слезингер / - М.: Наука, 1964. - 720 с.
11. *Лойцанский Л. Г.* Механика жидкости и газа //Л. Г. Лойцанский / М.: Наука, 1973. - 848 с.
12. *Форсайт Дж.* Машинные методы математических вычислений //Дж. Форсайт, М. Малькольм, К. Моулер / - М.: Мир, 1980. - 280 с.
13. *Тихонов А. Н.* Уравнения математической физики // А. Н. Тихонов, А. А. Самарский / - М.: Наука, 1972. - 735 с.
14. *Zhao Changyu* The design of low speed cascade wind tunnel // Zhao Changyu, Li Guangli / Journal of Shenyang institute of aeronautical engineering, 2009.№4, P15-P17, China.
15. *Guowen L.* Speed and angle control design of HIT wind tunnel test system // Li Guowen, Changren Li , Guangli Li / Journal of Shenyang institute of aeronautical engineering, 2010. №2, P4 - P8, China.
16. *Зинченко В. П.* Исследование и реализация алгоритма адаптивного управления экспериментом // В. П. Зинченко / Проблемы управления и информатики. - 2001. - № 3. - С. 58 - 69.
17. *Зинченко В. П.* Алгоритмы и базовые программные модули для управления технологическими модулями Prometheus // В. П. Зинченко, С. В. Зинченко / УСИМ, 2007. - № 5. - С. 52 – 60.
18. *Зинченко С. В.* Исследование характеристик знание ориентированных интеллектуальных систем мягкого реального времени // С. В. Зинченко/ Комп'ютерні засоби, мережі та системи. 2012, №11. - С. 13 - 22.