



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS**

N1, ТОМ 13 (2007) 17-24

УДК 624.012

(07)-0128-1

ВІТРОВІ НАВАНТАЖЕННЯ НА ЕЛЕМЕНТИ ТРИГРАННИХ БАШТ І ПАКЕТИ ВИТЯЖНИХ ТРУБ

О.В. Атаманчук, І.С. Холопов, Д.Д. Чернишев

Самарський державний архітектурно-будівельний університет,

вул. Молодогвардійська, 194, 443001, м. Самара, Росія.

E-mail: aleksejj-atamanchuk@rambler.ru

Отримана 8 січня 2007; прийнята 15 січня 2007

Анотація. У статті наведені результати визначення вітрових навантажень на баштові споруди, що включають пакет із трьох витяжних труб, а також на споруди у вигляді пакета із трьох труб. Виконано експеримент над моделлю пакета із трьох труб в аеродинамічній трубі замкнутого типу з відкритою робочою частиною. Проведено дослідження впливу вітрового потоку на пакет із трьох труб за допомогою методу кінцевих елементів. Представлено картини обтікання поверхні пакета із трьох труб при різних кутах атаки вітрового потоку. Отримано аеродинамічні коефіцієнти для пакета із трьох труб з урахуванням впливу оббудовування, а також при різних відстанях між трубами. Виконано якісний аналіз напружено-деформованого стану елементів витяжної башти. Запропоновано інженерну методику визначення вітрового навантаження на баштове спорудження тригранної форми, що несе пакет із трьох труб.

Ключові слова: пакет труб, аеродинамічний коефіцієнт, витяжна башта.

ВЕТРОВЫЕ НАГРУЗКИ НА ЭЛЕМЕНТЫ ТРЕХГРАННЫХ БАШЕН И ПАКЕТЫ ВЫТЯЖНЫХ ТРУБ

А.В. Атаманчук, И.С. Холопов, Д.Д. Чернышев

Самарский государственный архитектурно-строительный университет,

ул. Молодогвардейская 194, 443001, г. Самара, Россия.

E-mail: aleksejj-atamanchuk@rambler.ru

Получена 8 января 2007; принята 15 января 2007

Аннотация. В статье приведены результаты определения ветровых нагрузок на башенные сооружения, включающие пакет из трех вытяжных труб, а также на сооружения в виде пакета из трех труб. Выполнен эксперимент над моделью пакета из трех труб в аэродинамической трубе замкнутого типа с открытой рабочей частью. Проведено исследование воздействия ветрового потока на пакет из трех труб с помощью метода конечных элементов. Представлены картины обтекания поверхности пакета из трех труб при различных углах атаки ветрового потока. Посчитаны аэродинамические коэффициенты для пакета из трех труб с учетом влияния обстройки, а также при различных расстояниях между трубами. Выполнен качественный анализ напряженно-деформированного состояния элементов вытяжной башни. Предложена инженерная методика определения ветровой нагрузки на башенное сооружение трехгранной формы, несущее пакет из трех труб.

Ключевые слова: пакет труб, аэродинамический коэффициент, вытяжная башня.

WIND LOADS ON THE TRIHEDRAL TOWER ELEMENTS AND VENTILATION PIPE PACKAGES

A.V. Atamanchuk, I.S. Kholopov, D.D. Chernyshev

*Samara State Architectural and Building University,
194, Molodogvardeyskaya str., 443001, Samara, Russia.
E-mail: aleksejj-atamanchuk@rambler.ru*

Received 8 January 2007; accepted 15 January 2007

Abstract. There are given the results of determining wind loads on tower structures including a package of three ventilation pipes and on the structures in the form of a three-pipe package. There was done an experiment in a wind tunnel of a closed type with the open working section above the three-pipe package model. An influence of a wind flow on the three-pipe package was studied with the help of the FEM. There are presented the pictures of flow past a three-pipe package surface at different angles of a wind flow attack. The shape factor was calculated for a three-pipe package, a rigging influence and different distances between pipes being included. A qualitative analysis of the stress-deformed state of stack elements was performed. An engineering procedure of specifying a wind load on a trihedral tower structure carrying a three-pipe package is put forward.

Keywords: pipe package, shape factor, stack.

Введение

Интенсификация промышленного производства связана с увеличением объемов и степени концентрации вредных выбросов. Для охраны природы используют вынос предварительно очищенных газов из производственной зоны на высоту 150÷500 м с тем, чтобы рассеять их на значительную площадь и тем самым снизить концентрацию до безопасного уровня. При этом создаются мощные сооружения башенного типа, внутри которых располагаются вытяжные трубы диаметром 3÷8 м или самонесущие пакеты из нескольких труб. В настоящее время стали широко применяться башенные сооружения, воспринимающие ветровую нагрузку от пакета из трех труб. Возникает вопрос по определению давления ветра не только на саму конструкцию решетчатой башни, но и на пакеты труб, которые находятся внутри башни и передают нагрузку от ветра на конструкцию башни. В нормативных и различных других источниках литературы теоретическое определение давления ветра на пакеты труб практически отсутствует. Экспериментальные данные по обдувке труб в аэродинамической трубе содержат, как правило, информацию, которая применима лишь для узкого круга задач.

Экспериментальные исследования обдувки пакета из трех труб в аэродинамической трубе

Для определения давления ветра и аэродинамических коэффициентов на поверхности труб был выполнен эксперимент в аэродинамической трубе замкнутого типа с открытой рабочей частью, над моделью пакета из трех труб. Целью эксперимента было определение избыточного статического давления на поверхности пакета труб, возникающего от скоростного потока ветра.

Обдуваемая модель состояла из трех труб одинакового диаметра. Рассматривалось семь углов атаки ветрового потока от 0° до 180° , через каждые 30° . Эксперимент проводился при числах Рейнольдса $Re=4.6 \cdot 10^4$. При проведении эксперимента выбрано четыре варианта расстояния между центром диаметров труб $L = d, 1.5d, 2d, \text{ и } 3d$ (где d – диаметр одной трубы). Анализ полученных и обработанных экспериментальных данных показал следующее: 1) Аэродинамический коэффициент труб, стоящих в одном пакете, перестает быть зависимым, когда $L > 3d$. В этих условиях можно считать, что трубы следует рассматривать как отдельно стоящие. 2) Максимальный продольный

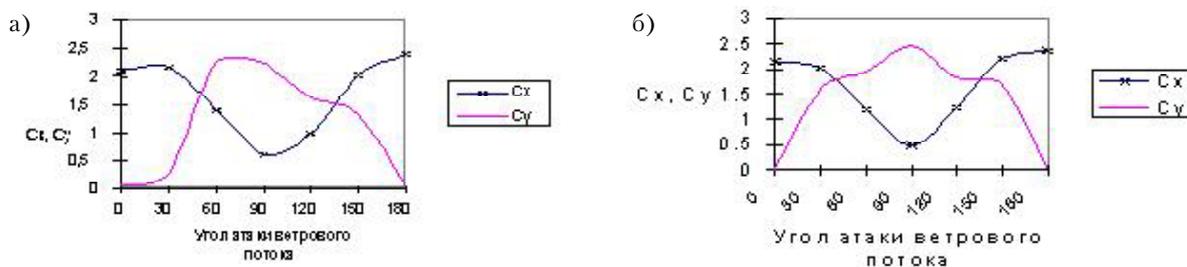


Рис. 1. Значения аэродинамических коэффициентов для пакета из трех труб, а) при $L/D=1,5$; б) при $L/D=2$;

аэродинамический коэффициент $C_x=2,55$ для пакета труб наблюдается в опыте, когда $L=3d$, при угле атаки ветрового потока ноль градусов. Максимальный поперечный аэродинамический коэффициент $C_y=-2,212$ для пакета труб получен в опыте, когда $L=3d$, при угле атаки ветрового потока сто двадцать градусов. 3) Максимальный $C_x=0,836$ для одной трубы из пакета получен в опыте, когда $L=3d$, при угле ветрового потока сто восемьдесят градусов. Максимальный $C_y=0,976$ для одной трубы из пакета был получен в опыте, когда $L=d$ и угол атаки ветрового потока - девяносто градусов. 4) Чем меньше L , тем меньше аэродинамические коэффициенты для пакета труб (при числе Рейнольдса $Re=4,6 \cdot 10^4$).

Проведено исследование воздействия ветрового потока на пакет из трех труб с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Исследование проводилось с применением вычислительного газодинамического пакета *ANSYS-FLOTRAN*, основанного на МКЭ. Целью численного эксперимента являлось: 1) определение значения величин давления, возникающего от ветрового потока, в точках на поверхности труб в диапазоне чисел Рейнольдса $1,33 \cdot 10^6 \div 18,75 \cdot 10^6$, соответствующих реальной ветровой нагрузке на башни для I-VII ветрового района; 2) получение интегральных характеристик потока (продольный и поперечный аэродинамический коэффициент) для каждой трубы и для всего пакета в целом; 3) для описания всей картины течения изучить величины и направления скоростей и характер течения в областях, расположенных около цилиндров.

Соотношения расстояний между трубами L/D принимались равными: $L/D=1,5, 2$ и 3 (где

L – расстояние между центром диаметров труб, D – диаметр труб). Направление ветрового потока выбиралось от 0 и до 180 градусов с поворотом через каждые 30 градусов.

В результате были получены значения давлений на поверхности труб. Данные значений были проинтегрированы и получены значения продольных и поперечных аэродинамических коэффициентов для каждой трубы и для всего пакета в целом. Изменения продольного и поперечного аэродинамического коэффициента для пакета из трех труб в зависимости от направления атаки газового потока и расстояния между центрами диаметров труб показаны на рис. 1 (а,б):

В ходе исследований при выполнении эксперимента по определению ветрового воздействия на пакет из трех труб получены следующие результаты: 1) на основе метода конечных элементов разработана методика для определения параметров ветрового потока, обтекающего пакет труб; 2) уточнены основные размеры при построении и выборе рабочей области воздушного потока, определен размер и шаг ячеек сетки, а также шаг по времени; 3) полученное давление и визуализация течения в тестовых расчетах подтверждают достоверность предложенной методики; 4) сравнение данных, полученных с помощью метода конечных элементов, с данными, полученными в аэродинамической трубе, показали совпадение с погрешностью от 10 до 20% (в запас); 5) получено значение давления на поверхности обтекаемых труб; 6) для определения продольного и поперечного аэродинамического коэффициента для пакета, состоящего из трех труб, построен график зависимости аэродинамических коэффициен-

тов от расстояния между центром диаметров труб (рис. 1 а,б); 7) получены картины обтекания ветровым потоком пакета из трех труб, при различных углах ветрового потока и расстояниях между центрами диаметров (рис. 2):

Анализ напряженно-деформированного состояния трехгранных башен, несущих пакет из трех вытяжных труб

Исследуются особенности напряженно-деформированного состояния трехгранных башен, несущих пакет из трех вытяжных труб (рис. 3). Наличие обстройки (вертикальные стойки башни) оказывает влияние при воздействии ветра на вытяжные трубы. Для определения этого влияния выполнен дополнительный численный эксперимент на основе метода конечных элементов. Получены значения аэродинамических коэффициентов (рис. 4 а,б) и определена картина обтекания элементов башни ветровым потоком.

На основе полученных данных по определению ветровой нагрузки рассматривается за-

дача, связанная с анализом качественных характеристик напряженно-деформированного состояния элементов стальной башни с тремя вытяжными трубами.

Стальная типовая вытяжная башня треугольного сечения в плане, высотой 180 м имеет три газоотводящих ствола, которые находятся внутри башни и опираются в горизонтальном направлении на обстройку в плоскости диафрагм (рис. 3). Архитектурное решение рассматриваемой вытяжной башни является по своей сути типовым. Подобная башня была запроектирована АО «УРАЛВНИПИЭНЕРГОПРОМ» на ТЭЦ г. Березники Пермской области.

Рассматривается три варианта действия ветровой нагрузки на башенное сооружение, несущее внутри обстройки пакт из трех труб (рис. 3):

- 1) ветровая нагрузка и на обстройку, и на пакет труб определяется в соответствии со СНиП 2.01.07-85*, как на отдельностоящие трубы;
- 2) ветровая нагрузка и на обстройку, и на пакет труб определяется в соответствии с

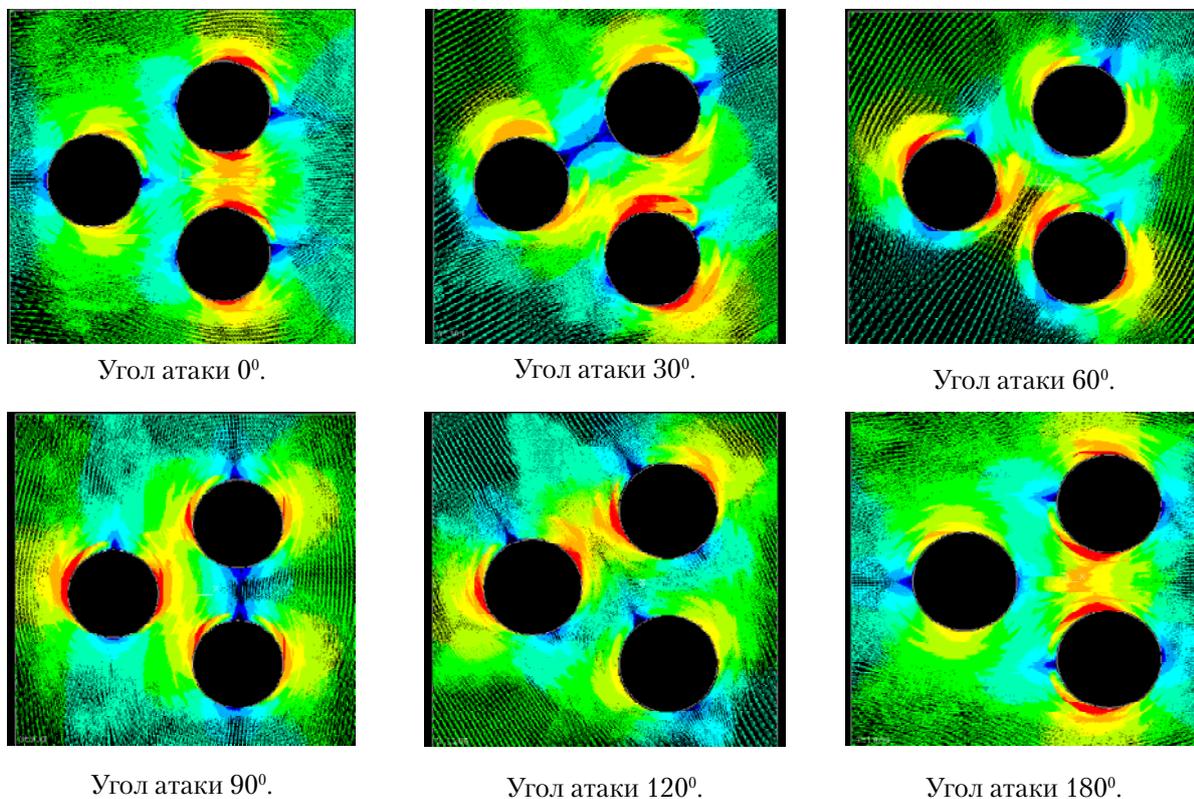


Рис. 2. Картина обтекания поверхности пакета из трех труб при углах ветрового потока, равных 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 180°, при $L/D=2$.

данными, полученными автором с учетом влияния обстройки (рис. 4);

- 3) ветровая нагрузка на пакет труб определяется в соответствии с данными, полученными автором без учета влияния обстройки (рис. 1), а на обстройку – по методике СНиП 2.01.07-85*.

Сравнение результатов усилий и характера деформаций элементов башни производились при направлении углов ветрового потока от 0° и до 180° через каждые 30° . В результате произведено: 1) сравнение усилий в элементах башни, полученных по трем вариантам приложения нагрузок; 2) сравнение линейных и угловых перемещений в элементах башни по трем вариантам приложения нагрузок; 3) сравнение линейных перемещений в зависимости от форм колебаний башни; анализ линейных перемещений в зависимости от вида загрузки.

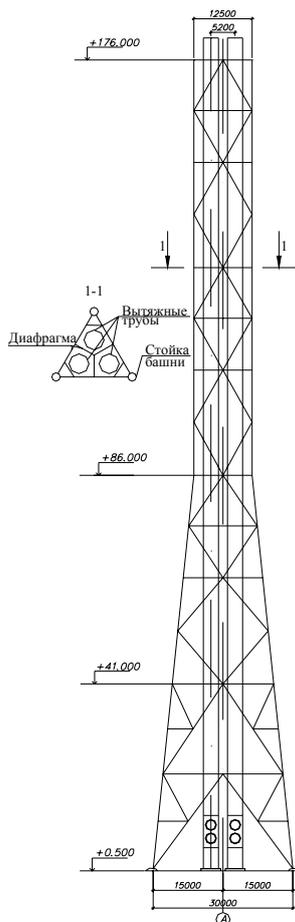


Рис. 3. Геометрическая схема вытяжной башни с тремя газоотводящими стволами.

Усилия сравнивались как в абсолютных, так и в относительных значениях (в процентном соотношении). Причем, за основу, то есть за 100% принимались усилия в элементах башни, полученные от ветровых нагрузок, которые были определены по методике СНиП 2.01.07-85* при угле атаки воздушного потока равного 0° .

Максимальные продольные усилия в вертикальных и горизонтальных стойках и распорках башни были получены при углах атаки ветрового потока равного 0° , 30° и 180° . Максимальные усилия в горизонтальных распорках башни, полученные от ветровой нагрузки, которая определялась с помощью разработанной методики, превышают до 40% усилия, возникающие от воздействия нагрузки определяемой в соответствии со СНиП 2.01.07-85*. Значительные усилия в горизонтальных элементах башни говорят о возникновении эффекта закручивания конструкции вследствие неравномерности срыва вихрей воздушного потока, а также учета воздействия ветра под различными углами атаки.

Установлено, что влияние обстройки приводит к уменьшению ветровой нагрузки на пакет труб в треугольной башне. Анализ вклада по

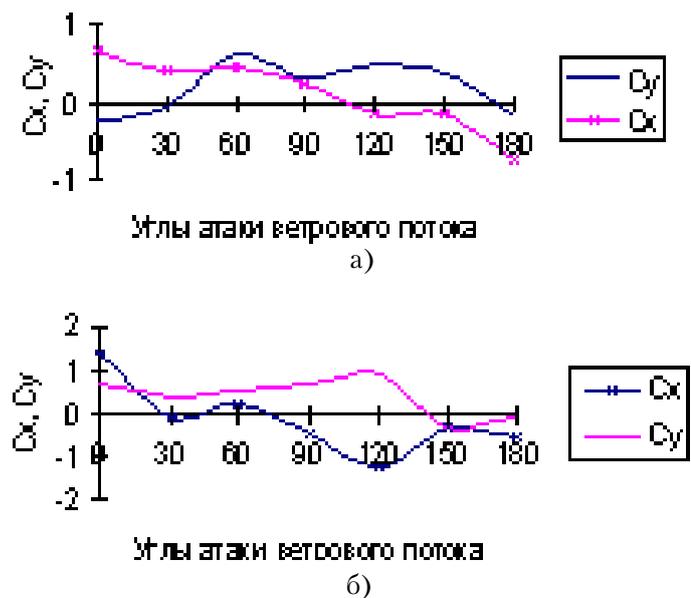


Рис. 4. Значения аэродинамических коэффициентов, а) для пакета из трех труб с учетом влияния обстройки, при $L/D=1,5$; б) для обстройки вытяжной башни (вертикальные стойки).

собственным формам колебаний показал, что необходимо учитывать вклад от усилий и перемещений в элементах и узлах башни до пятой формы.

Анализ напряженно-деформированного состояния показал, что действие ветровых нагрузок на обстройку и пакет труб, вычисленных по методике СНиП 2.01.07-85*, приводит к завышению усилий и перемещений в элементах башни. При этом не улавливается закручивающий эффект от действия ветра.

В то же время сравнение второго и третьего вариантов определения ветровой нагрузки показал, что усилия и перемещения в обоих вариантах отличаются незначительно. При этом закручивающий эффект в том и другом варианте вызывает увеличение усилий в элементах диафрагм и раскосов.

Методика определения ветровой нагрузки на башенное сооружение трехгранной формы, несущее пакет из трех труб

На основании проведенного анализа напряженно-деформированного состояния и выполненных исследований по определению аэродинамических коэффициентов разработана методика определения ветровой нагрузки на башен-

ное сооружение трехгранной формы, несущее пакет из трех труб. Блок-схема определения аэродинамических коэффициентов приведена на рис. 5:

Заключение

1. На основе метода конечного элемента разработана методика численного эксперимента, получены значения аэродинамических коэффициентов и давления для пакета из трех труб, расположенных на расстоянии $L=(1,5\div 3D)$. Получены картины обтекания ветровым потоком пакета из трех труб без учета и с учетом влияния обстройки.
2. Проведен эксперимент в аэродинамической трубе по обдувке модели пакета из трех труб, определены параметров ветрового потока на поверхности труб.
3. Произведен анализ качественных характеристик напряженно-деформированного состояния башни с учетом статического и динамического действия ветровой нагрузки. Установлено, что при воздействии ветра под различными углами атаки происходит закручивание конструкции башни.
4. Анализ напряженно деформированного состояния конструкций башни показал, что

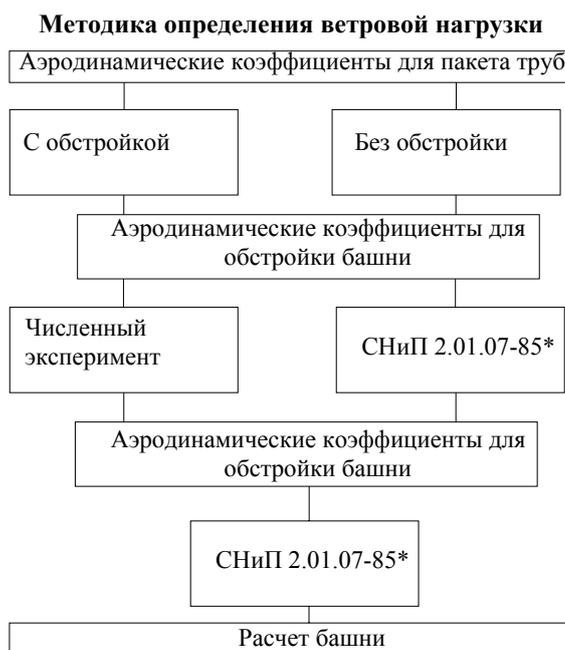


Рис. 5. Блок-схема определения аэродинамических коэффициентов при расчете башен.

требуется учитывать три угла атаки ветрового потока: 0° , 30° и 180° . Вклад от усилий и перемещений в элементах и узлах башни необходимо учитывать до пятой формы собственных колебаний.

5. Влияние обстройки рассматриваемой вытяжной башни на пакет труб внутри башни приводит к снижению ветровых нагрузок и аэродинамических коэффициентов для труб пакета.
6. Разработана методика определения ветровой нагрузки на элементы башни с вытяжными трубами.

Литература

1. Атаманчук А.В., Холопов И.С. Исследования воздействия ветрового потока на пакет из трех труб с помощью метода конечных элементов. // Известия высших учебных заведений. Строительство. — №8. — 2005. — С.11-16
2. Атаманчук А.В., Холопов И.С., Чернышев Д.Д./ Ветровые нагрузки на элементы башни с вытяжными трубами// Строительный вестник Российской инженерной академии: Труды секции "Строительство" Российской инженерной академии. — Вып. 6. РИА. — М., 2005.
3. Атаманчук А.В., Холопов И.С., Чернышев Д.Д./ Исследования работы вытяжных башен с пакетом труб при воздействии ветровой нагрузки// Материалы международной научно-технической конференции. «Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных, пластмассовых конструкций в строительстве и на транспорте». — СамГАСА, 2005.
4. Атаманчук А.В., Холопов И.С., Шахов В.Г./Проведение экспериментальных исследований по обдувке пакета из трех труб в аэродинамической трубе//Материалы международной научно-технической конференции «Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных, пластмассовых конструкций в строительстве и на транспорте». — СамГАСА, 2002.
5. Атаманчук А.В., Холопов И.С./ Определение ветрового давления на пакет труб// Сборник научных трудов. "Современные строительные конструкции из металла и древесины". ОГАСА. — Одесса: Город мастеров, 2001.
6. Атаманчук А.В. Экспериментальные исследования по обдувке пакета из трех труб в аэродинамической трубе// Проблемы оптимального проектирования сооружений (Доклады V-го Всероссийского семинара). — Новосибирск, 2005.
7. Жукаускас А., Улинскас Р., Картинас В. Гидродинамика и вибрации обтекаемых пучков труб. — Вильнюс: Мокслас, 1984. — С. 312.
8. Казакевич М.И. Аэродинамика мостов. — М.: Транспорт, 1987. — 240 с.
9. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения. — М.: Стройздат, 1984. — С. 104-107.
10. Солодарь М.Б., Кузнецова М.В., Плишкин Ю.С. Металлические конструкции вытяжных башен. — Л.: Стройздат, 1975. — 186с.
11. Сува Йосихидэ "Расчет аэродинамических высотных зданий". Nihon Kaze kogakkaishi. = J. wind Eng. — 1999- 102, № 968 — С. 36.
12. Choi Changkoon, Kim Yunseok.. "Аэродинамический отклик трех близко расположенных круглых цилиндров, обтекаемых равномерным потоком. Отклик цилиндра, расположенного за двумя другими". Nihon Kaze kogakkaishi. = J. wind Eng. — 1992- № 51 — С. 15-26.
13. Dulinska J., Flaga A. "Численный расчет и структурный анализ башни охлаждения высотой 150 м при различных типах ветровой нагрузки". Arch. Civ. Eng. — 1992. — 38, №3 — С. 205-222. 64
14. Gu Ming, Shi Zongcheng, Zhang Feng. "Модельные измерения индуцированных ветром колебаний новой телевизионной башни в Шанхае". Zhendong yu chongji. = vibr. And shock. — 1995. — 14. №2 — С.30-34. 7
15. Holmes J.D., Paevere P. "Динамическая реакция сквозных башен на действие ветра". Nat. conf. Publ. / inst. Eng., Austral. — 1994. - №94/8. — с. 333-335.
16. Kuo Chen-Hsiung. "Визуализация структуры течения за двумя круговыми цилиндрами, расположенными рядом". Proc. 3 rd Asian Symp. Visual., chiba. May 15-20. 1994: ASV/ 94. — Tokyo. 1994 — С. 186-192.
17. Schneider W., Thiele R. Schneider W., Thiele R. "Напряженно деформированное состояние в основании стальных дымовых труб под ветровой нагрузкой". Proc. 5 th. Int. Offshore and Polar Eng. Conf., The Hague, June 11-16, 1995. vol. 4 — Golden (colo), 1995. — с. 104-108.
18. Zuranski J., Jozwiak R., Kawecki J. "Исследование особенностей аэродинамических характеристик пучков круговых цилиндров". Fourth international colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications, Bohum sept. 11-14, 2000; vol. Abstr. bohun: Ruhr — Univ. 2000, с. 543-544.

Атаманчук Олексій Вячеславович є доцентом кафедри металевих і дерев'яних конструкцій Самарського державного архітектурно-будівельного університету. Наукові інтереси: вітрові навантаження на витяжні вежі і пакети труб, надійність висотних споруд.

Холопов Ігор Серафимович є завідувачем кафедрою металевих і дерев'яних конструкцій, директором будівельного інституту Самарського державного архітектурно-будівельного університету. Член Російської Академії транспорту, радник РАБН. Наукові інтереси: оптимізація і надійність будівельних конструкцій, будівельна аеродинаміка, динаміка будівель і споруд .

Чернишов Дмитро Давидович є аспірантом і асистентом кафедри металевих і дерев'яних конструкцій Самарського державного архітектурно-будівельного університету. Наукові інтереси: будівельна аеродинаміка витяжних веж і пакета труб.

Атаманчук Алексей Вячеславович является доцентом кафедры металлических и деревянных конструкций Самарского государственного архитектурно-строительного университета. Научные интересы: ветровые нагрузки на вытяжные башни и пакеты труб, надежность высотных сооружений.

Холопов Игорь Серафимович является заведующим кафедрой металлических и деревянных конструкций, директором строительного института Самарского государственного архитектурно-строительного университета. Член Российской Академии транспорта, советник РАСН. Научные интересы: оптимизация и надежность строительных конструкций, строительная аэродинамика, динамика зданий и сооружений

Чернышев Дмитрий Давидович является ассистентом кафедры металлических и деревянных конструкций Самарского государственного архитектурно-строительного университета. Научные интересы: строительная аэродинамика вытяжных башен и пакета труб.

Atamanchuck Alexey Vyacheslavovich is an associated professor of the Department of metal and wooden structures of Samara State Architectural and Building University. His scientific interests are: wind loads on ventilation pipes and pipe packages, reliability of high structures.

Kholopov Igor Serafymovych is head of the Department of metal and wooden structures, director of the Building Institute at Samara State Architectural and Building University, a member of the Russian Academy of Transport, a RABS adviser. His scientific interests are: optimization and reliability of building structures, building aerodynamics, dynamics of buildings and structures.

Chernyshev Dmitry Davidovich is an assistant of the assistant of the Department of metal and wooden structures of Samara State Architectural and Building University. His scientific interests are building aerodynamics of ventilation towers and of a building package.