

11. **Блюсс Б.А.** Расчет термогидромеханических параметров трубопроводного транспорта полидисперсных материалов / Б.А. Блюсс, Е.В. Семенов // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – №1. – 2005. – С. 85 – 89.

Надійшла до редколегії 15.02.10

УДК 502: 519.6

Е.Р. Абрамовский

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

## **АЭРОЛОГИЯ ОБЪЕКТОВ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ В РАСЧЕТАХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ**

Выполнен анализ поля воздушных потоков вокруг наиболее типовых городских сооружений. На основе выполненных расчетов и использования экспериментальных данных получены полуэмпирические соотношения, позволяющие определить коэффициенты сопротивления и боковых сил, которые действуют на городские сооружения при различных скоростях и направлении ветра. Наличие таких данных позволяет определить характер потоков загрязненного воздуха в нижнем слое городской атмосферы.

*Ключевые слова: ветровой поток, городские объекты, аэродинамические силы, загрязнение воздуха.*

Проведено аналіз поля повітряних потоків біля найбільш типових міських споруд. На основі проведених розрахунків і використання експериментальних даних отримано напівемпіричні співвідношення, які дозволяють визначити коефіцієнти опору і бокових сил, що діють на міські споруди при різних швидкостях і напрямках вітру. Наявність таких даних дозволяє визначити характер потоків забрудненого повітря в нижньому шарі міської атмосфери.

*Ключові слова: вітровий потік, міські об'єкти, аеродинамічні сили, забруднення повітря.*

The wind flow field near the typical city structures is studied and analyzed. Semi empirical relations, which make it possible to determine aerodynamic forces, acting on buildings and structures, are obtained on the basis of calculations and the use of experimental dates. Such relations can be used in analysis of polluted air flow within the lower layer of city atmosphere.

*Keywords: wind flow, city buildings and structures, aerodynamic forces, air pollutions.*

**Введение.** Характер распространения загрязнений в рамках застроенной территории, существенным образом, зависит от высоты над поверхностью земли, на которой рассматривается ветровое течение. Ветровой поток над городской территорией можно условно разделить по высоте на три слоя. Первый, околосземный, имеет толщину, обусловленную средней высотой зданий и других объектов. Второй – расположен над околосземным и имеет такую толщину (высоту), на которой сохраняется влияние поверхностной структуры. Третий слой начинается на высоте, где влияние этой структуры отсутствует. Благодаря турбулентному характеру ветрового потока и вертикальному перемешиванию загрязнение поступает во все три слоя, но распространяется с различной скоростью. Наиболее важным с точки зрения оценки вредного воздействия загрязнений на жителей города есть нижний слой и, особенно, пешеходные зоны с высотой примерно 2 м над поверхностью земли. Для анализа ветровых потоков в околосземном слое необходимо исследовать аэрологию городских объектов, таких как отдельные здания, сооружения, уличные каньоны и т. п. Речь идет в определении давления на поверхности зданий и сооружений, их лобовом сопротивлении, а также о характере потоков непосредственно возле этих объектов. Следует заметить, что задачи определения

этих параметров для отдельных сооружений и их взаимного влияния в зависимости от вида застройки являются очень сложными [1; 2]. Приближенные решения получены только для наиболее простых задач. Наиболее надежными методами исследований остаются продувки моделей в аэродинамических трубах, гидравлических лотках, а также измерения параметров полномасштабного потока вокруг реальных объектов.

Для расчета течений около плохо обтекаемых тел довольно широко применяются приближенные, полуэмпирические методы. Использованию их для исследования взаимодействия типовых городских объектов с ветровым потоком и посвящена предлагаемая работа.

Рассмотрим физическую картину течения, реализующуюся в окрестности объекта. Упрощенным вариантом является, так называемое, двумерное течение. Имеется в виду поток вокруг строения, которое имеет большой (бесконечный) размер по длине  $l$  по отношению к высоте  $h$  и ширине  $b$  (рис.1). Предполагается, что ветровой поток направлен перпендикулярно к передней стене здания и рассматривается в плоскости  $xOz$ . Здание имеет форму параллелепипеда.

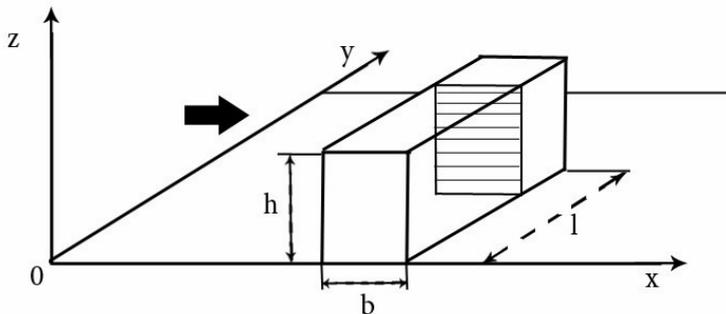


Рис. 1. Двумерный поток возле здания большой длины (в плоскости заштрихованного сечения)

Если длина здания существенно превышает его высоту и ширину то в центральном сечении, показанном на рис.1, реализуется картина течения, которое можно считать двумерным. В данном случае параметры этого течения являются функциями лишь координат  $x$  и  $z$ . Направление векторов скорости в поле ветрового потока условно изображено на рис. 2.

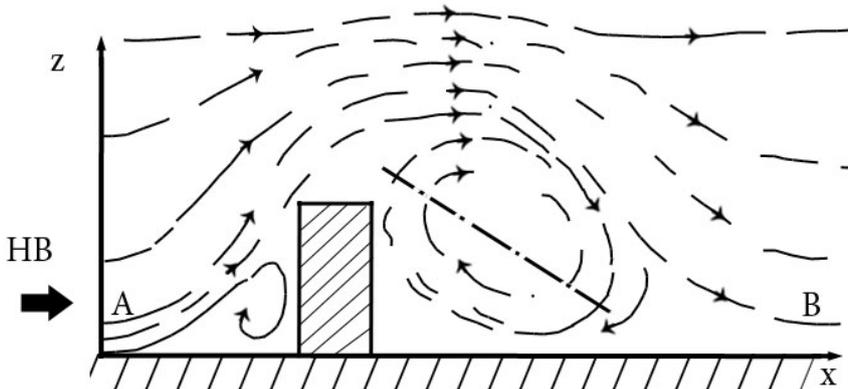


Рис. 2. Общая картина ветрового течения вокруг здания в двумерном приближении (HB – направление ветра)

Когда поток воздуха встречает на своем пути здание в форме параллелепипеда, то он, еще не достигая передней стенки на расстоянии приблизительно  $2h$ , начинает подниматься вверх и при этом достигает высоты тоже равной  $2h$  приблизительно на расстоянии  $1,5h$  от задней стенки. В дальнейшем, поток опускается вниз и достигает поверхности земли уже на расстоянии  $5\div 6h$ . При этом возникают две вихревые зоны – одна, более мощная, позади здания, и вторая, значительно меньшая по масштабу – перед ней. Вихревая зона позади здания ограничена сверху так называемой «нулевой линией» потока. Начало и конец ее обозначены буквами  $A$  и  $B$ . Можно отметить, что теневая вихревая зона имеет циркуляционную форму, а линии тока образуют своеобразные эллипсы. Большая ось эллипса показана штрих-пунктиром и наклонена под углом к оси  $x$  приблизительно на  $6^\circ - 7^\circ$ . Обозначенная картина течения соответствует данным экспериментов, которые проводились в аэродинамических трубах в гидротках и при натурных измерениях ветрового потока возле зданий [2].

Если высота здания  $h$  значительно превышает ее ширину  $b$  (при значительной длине  $l$ , то приземной поток можно рассматривать как двухмерный уже в новой плоскости  $xu$  (рис. 3).

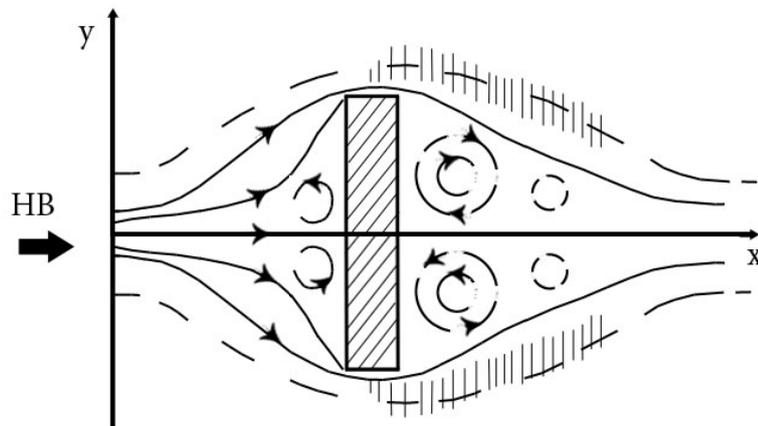


Рис. 3. Картина течения возле высокого и длинного здания ( $HV$  – направление ветра). Вертикальной штриховкой обозначены зоны высоких скоростей

Из рисунка видно, что в этом случае циркуляционные звенья возникают в горизонтальной плоскости как непосредственно перед зданием, так и за ним. Такую картину течения можно зафиксировать на незначительной высоте (приблизительно 2 м над поверхностью земли). Следует отметить, что рассмотренные модели течения являются достаточно упрощенными. Вихревые зоны, показанные на рис. 2 и рис. 3, возникают возле сооружения одновременно и взаимодействуют между собой, то есть течение будет пространственным, трехмерным. Каждое из сооружений может быть произвольно ориентированным по отношению к направлению ветра. Картина течения зависит от типа расположения зеленых насаждений, топографии местности и других факторов. Сюда нужно добавить также тот фактор, что скорость ветра в пограничном слое изменяется с высотой. Более того, течение вокруг сооружения является также нестационарным, поскольку вихри срываются из острых кромок здания с определенным интервалом. Таким образом, в данном случае для анализа кроме числа Рейнольдса нужно использовать и параметр Струхала, который определяет периодические явления в потоке.

При этом

$$Re = \frac{Vl}{\nu}, \quad (1)$$

$$Sh = \frac{Nl}{V}, \quad (2)$$

Здесь  $N = 1/T$ ,  $T$  - период колебания,  $l$  - характерный размер,  $V$  - скорость,  $\nu$  - кинематический коэффициент вязкости.

Для расчета течения воздуха с использованием приближенных моделей применяются разные методы. Метод конформных отображений позволяет построить линии потока, подобные тому, что возникают при обтекании профиля Жуковского (рис. 4).

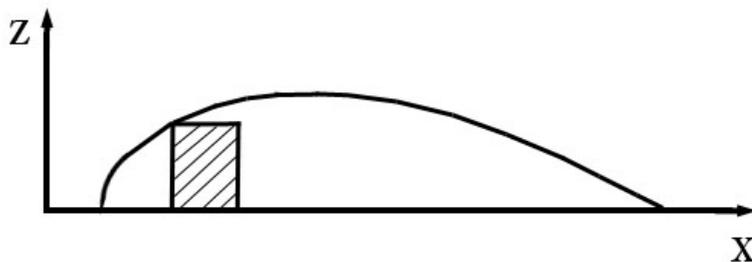


Рис. 4. Нулевая линия тока при обтекании здания в соответствии с конформным отображением

Детальное описание построения можно найти, например, в [2]. Здесь приводятся все основные расчетные соотношения, дается метод элементарных источников и стоков, которые необходимо расположить определенным образом в фиксированных точках геометрической фигуры, отображающей поле течения. Если задаться интенсивностью сосредоточенных источников и стоков, то можно построить линии тока вокруг сооружения, определить скорости течения, а также построить форму вихревой зоны. Для расчета течения вокруг сооружений широко используется метод дискретных вихрей, с которым можно ознакомиться в [6; 7] и др.

Как было отмечено ранее, к настоящему времени еще не разработаны надежные математические модели для расчета необходимых параметров таких течений. Задача усложняется тем, что городские сооружения, как правило, расположены на местности в определенном порядке на небольшом расстоянии друг от друга и создают так называемый «городской лабиринт». Течение воздуха в таком лабиринте на высоте 2-х метров над поверхностью земли (высота расположения пешеходов) вызывает наибольший интерес, поскольку именно на этом уровне появляется необходимость определять концентрацию воздушных загрязнений.

Наиболее надежными инструментами исследования пространственных течений вокруг сооружений есть лабораторные эксперименты в аэродинамических трубах, а также натурные измерения параметров ветрового потока. Экспериментальные данные этого типа приведены в [1-4] и др.

Рассмотрим некоторые результаты исследований поля течения вокруг сооружений и данные о силовом действии потока на их поверхность. Пространственная картина течения с наветренной стены здания имеет вид, изображенный на рис. 5.

Распределение коэффициента давления на поверхности сооружений в виде куба и высокого сооружения в виде параллелепипеда, при набегании ветра по нормали к передней стенке, показано на рис. 6. Коэффициент давления получен из выражения

$$\bar{p} = \frac{2(p - p_\infty)}{\rho V_\infty^2}. \quad (3)$$

В этом выражении индекс « $\infty$ » обозначает параметр набегающего потока.

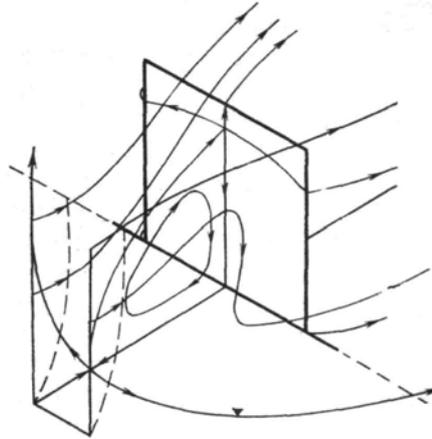


Рис. 5. Поле скоростей при набегании на переднюю стенку сооружения (с учетом пограничного слоя)

Экспериментальные исследования проводились также для сравнения силового действия на модель (рис. 7) и на натуральный объект. При натурном эксперименте бралась во внимание шершавость поверхности  $z_0$  на территории, где расположенное сооружение. При этом было задано  $H / z_0 = 170$ . Результаты этих исследований заимствованы из [3].

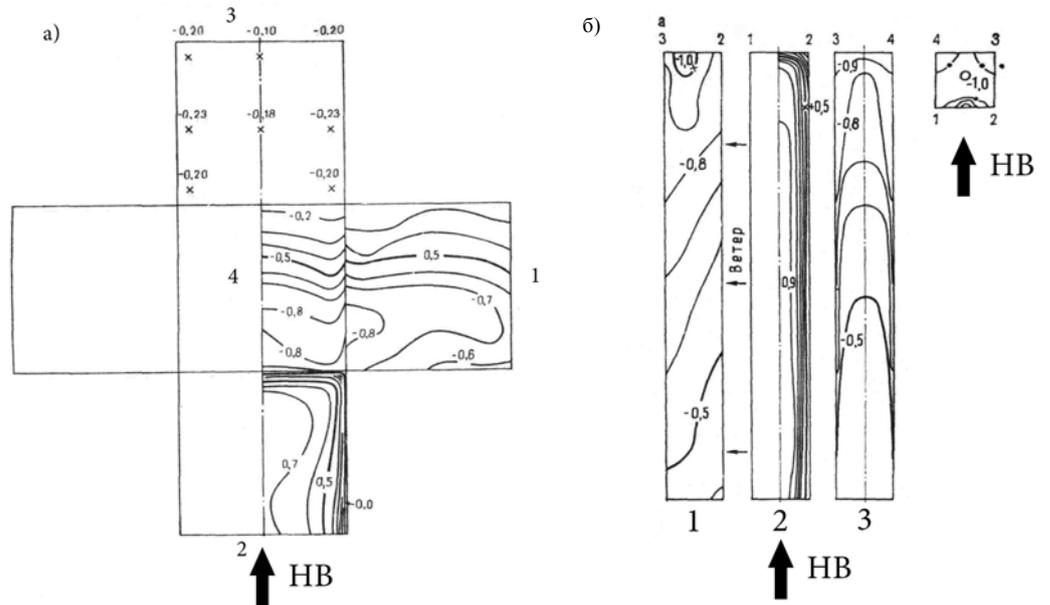


Рис. 6. Распределение коэффициента давления на сооружении в форме куба - (а) и высоком сооружении типа параллелепипеда (б): 1 – боковая сторона; 2 – наветренная сторона; 3 – подветренная сторона; 4 – кровля

Рассмотрев поле скорости и силовое действие ветра на отдельные сооружения, можно перейти к расчету распространения загрязнений в воздушном пространстве городских застроек.

Следует заметить, что приближенные соотношения типа формулы Гаусса для определения концентрации вредного вещества в воздухе можно использовать, если известна форма линии тока вокруг сооружения [5].

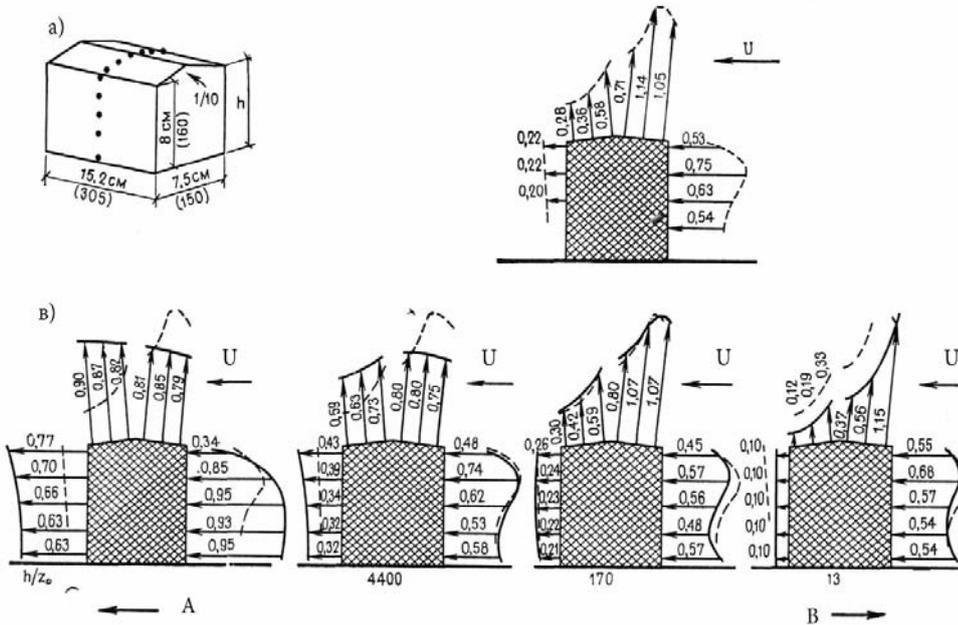


Рис. 7. Распределение коэффициента давления на поверхности натурального объекта (а) и на поверхности его модели (в). Пунктиром обозначено распределение  $\bar{p}$  при повышенной шероховатости (масштаб 1/20)

При плотной застройке территории ветровые потоки в городском лабиринте можно определить, если известно сопротивление отдельных элементов застройки. В связи с этим были проведены дополнительные исследования и получены соотношения, которые разрешают определить коэффициенты сопротивления типичных городских сооружений. Экспериментальные данные заимствованы из [1; 3; 5]. Рассмотрим сооружение, которое изображено на рис. 8.

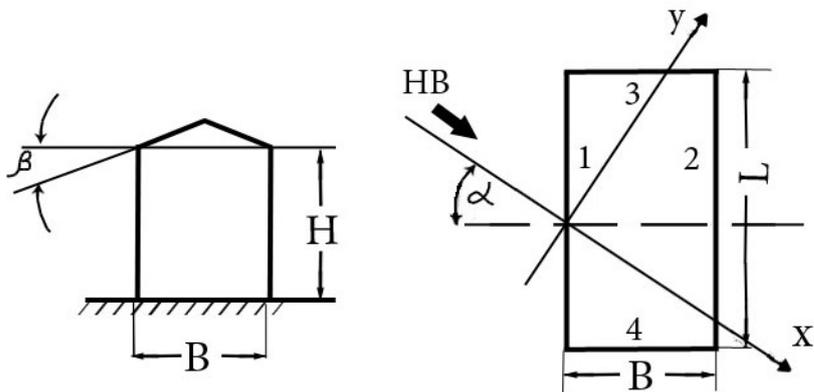


Рис. 8. Типичное городское сооружение, обтекаемое ветровым потоком (вид сбоку и вид в плане)

Лобовое сопротивление здания (без учета сопротивления кровли, которое считается незначительным) можно записать в виде

$$X = q_{\infty} S_M \left[ \bar{S}_1 (\bar{p}_1 - \bar{p}_2) \cos \alpha + \bar{S}_3 (\bar{p}_3 - \bar{p}_4) \sin \alpha \right]. \quad (4)$$

В этом выражении  $q_{\infty}$  есть динамическое давление (скоростной напор)

$$q_{\infty} = \frac{\rho_{\infty} V_{\infty}^2}{2}, \quad (5)$$

$S_M$  - характерная площадь

$$S_M = L \cdot H \quad (6)$$

$$S_1 = S_2 = L \cdot H; \quad S_3 = S_4 = H \cdot b; \quad \bar{S}_1 = S_1 / S_M; \quad \bar{S}_3 = S_3 / S_M$$

$\bar{p}_i$  - коэффициент давления на соответствующую поверхность, обозначенную цифрами. При этом: 1 - лобовая поверхность, 2 - теневая поверхность, 3, 4 - боковые поверхности.

В табл. 1 представлены коэффициенты лобового сопротивления четырех наиболее типовых городских сооружений при различной ориентации по отношению к направлению ветра. Коэффициенты отнесены к скоростному напору ветра и к площади передней стенки  $S_M = S_1 = H \cdot L$ .

Таблица 1

**Коэффициенты лобового сопротивления наиболее типовых городских сооружений.**

Нп/п	Н-В-L\α°	0	15	45	90
1	1-1-1	1,4	1,202	1,414	1,10
2	2,5-2-5	1,4	-	1,030	0,52
3	2-1-2	1,4	-	1,061	0,65
4	1-4-4	1,2	1,166	1,273	1,20

Из таблицы видно, что первое сооружение имеет форму куба, накрытого полой крышей, второе и третье сооружения моделируют высокие здания, а четвертое – здание небольшой высоты. Значения коэффициентов рассчитаны с помощью эмпирических соотношений, полученных на основе экспериментальных данных, приведенных в [1; 3;4]. Обозначения Н-В-L представляют собой отношение размеров высоты сооружения (Н), ширины (В) и длины (L).

Заключение. Получены соотношения и данные о лобовом сопротивлении наиболее типовых городских объектов, которые могут быть использованы в расчетах концентрации воздушных загрязнений, распространяющихся в пределах так называемого «городского лабиринта» по фильтрационной модели, в которой данные величины представляют собой сопротивление каркаса. (См. статью Е.В. Егорова и Н.Н. Лычагина «Фильтрационная модель распространения загрязняющих примесей в атмосфере городских лабиринтов» в настоящем Вестнике.)

### Библиографические ссылки

1. Девнин С.И. Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций: Справочник / С.И. Девнин. - Л., - 1983. – 320 с.
2. Серебровский Ф.Д. Аэрация жилой застройки / Ф.Д. Серебровский - М., - 1973. – 121 с.
3. Simiu E. Wind effects on structures. Second edition / E. Simiu, R.H. Scanlan. New York: A Wiley - Interscience Publication JOHN WILEY & SONS, - 1986. – 589 pp.
4. Wind Forces on Structures. Trans. ASCE, - 126(1961). P. 1124 - 1198.

5. **Абрамовский Е.Р.** Атмосфера больших городов / Е.Р. Абрамовский, Н.Н. Переметчик. – Дн., - 2007. – 187 с.
6. **Белоцерковский С.М.** Математическое моделирование плоскопараллельного отрывного обтекания тел / С.М. Белоцерковский, В.Н. Котовский, - М., - 1988. – 232 с.
7. **Русакова Т.И.** Задача численного расчета обтекания зданий воздушным потоком / Т.И. Русакова, В.И. Карплюк // Вісник Дніпропетр. ун-ту, Механіка, Т.1, вип.11, 2007. С. 53 - 59.

Надійшла до редколегії 28.12.09.

УДК 532.516

О.Г. Гоман\*, В. И. Давыдов\*, Ю.К. Романовский\*\*, Ю.Т. Шипилов\*\*  
\*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара  
\*\*Производственно-комерческая фирма «Курс»

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ГАЗА В ТРУБОПРОВОДЕ ПРИ ПОМОЩИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ

Рассмотрена методика определения расходной скорости потока газа в трубопроводе при помощи ультразвуковых измерителей скорости. Способ использования указанных измерителей основан на экспериментальной фиксации промежутков времени движения звукового импульсного сигнала от источника звука к его приемнику вдоль пути, расположенного наискосок по и против потока в некоторой измерительной плоскости, параллельной диаметральной. В работе дается алгоритм вычисления расходной скорости по данным измерения указанных промежутков времени.

*Ключевые слова:* ультразвуковые измерители скорости, турбулентные течения, техника измерения скорости потока в трубопроводах.

Розглянуто методику визначення витратної швидкості потоку газу в трубопроводі за допомогою використання ультразвукових вимірювачів швидкості. Ідея використання ультразвукових вимірювачів ґрунтується на експериментальному визначенні проміжків часу руху звукового імпульсного сигналу від джерела до приймача вздовж путі, розташованого навкіс за і проти потоку в деякій вимірювальній площині, паралельній діаметральній. У роботі дається алгоритм розрахунку витратної швидкості за даними вимірювання вказаних проміжків часу.

*Ключові слова:* ультразвукові вимірювачі швидкості, турбулентні течії, техніка вимірювання швидкості потоку в трубопроводах.

The method of measurement consumables velocity of the gas flow in the pipeline with using ultrasonic velocity devices was considered. The method of specified indexes is based on experimental fixation of periods of movement of sonic pulsed signal from the source of sound to its receiver along the way, which is situated obliquely down- upstream in some metrical plan and paralleled to its diametrical plan. The algorithm of calculation feet velocity according to dimensions of the specified intervals of time was given in this work.

*Keywords:* the ultrasonic velocity devices, turbulent flow, measuring techniques.

**Введение.** В последнее время в качестве расходомеров газа все чаще используются ультразвуковые измерители скорости. Идея их использования основана на том факте из гидромеханики, что скорость передачи возмущений в движущейся сжимаемой среде в данном направлении  $\vec{s}$  равна  $a + u_s$ , где  $a$  – скорость звука, а  $u_s$  – проекция скорости газа на данное направление. В связи с этим, скорость движения звукового сигнала, произведенного источником, непосредственно против потока (или под некоторым углом против потока) будет меньше, чем скорость движения сигнала вдоль потока (или под углом вдоль потока).