УДК 628.82

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ПОТОКА В ОБРАТНОМ ТЕЧЕНИИ ОТ ТИПА ПРИТОЧНОГО УСТРОЙСТВА

### Кочарьянц К.В.

ООО «Арктос», Санкт-Петербург, e-mail: nin-kasi@yandex.ru

В работе приведены результаты исследования влияния различных параметров на максимальную скорость обратного потока, который формируется при подаче приточного воздуха стесненной струей выше рабочей зоны. С помощью вычислительного комплекса ANSYS CFX, основанного на численном решении трехмерных дифференциальных уравнений Навье – Стокса, был выполнен расчет течения, формирующегоя в помещении при различных исходных условиях. В результате исследования определено, что максимальные значения скорости в обратном потоке наблюдаются в углах помещения. Также выявлено, что значения скоростей зависят от высоты установки приточного отверстия. Отклонение скоростей при изменении высоты установки составляет около 20%. Результаты расчета течения для различного вида воздухораспределительных устройств показали наличие существенного влияния кинематического коэффициента п воздухораспределителя на значение скорости в обратном потоке. Проведение серии численных исследований течения стесненной струи с использованием методов математического планирования эксперимента позволило разработать методику расчета параметров формируемого ею обратного потока в зависимости от вида приточного устройства.

Ключевые слова: кондиционирование помещений, численное моделирование, турбулентные течения, уравнения Навье – Стокса, воздухораспределение

# RESEARCH OF DEPENDENCE OF FLOW VELOCITY IN REVERSE FLOW FROM A TYPE SUPPLY AIR DIFFUSER

### Kocharyants K.V.

Saint-Petersburg LTD «Arktos», Saint-Petersburg, e-mail: nin-kasi@yandex.ru

In the study results of research of influence various parameters on maximum velocity of the reverse flow which is formed when supply air is fed by cramped jet over the working area are presented. By means of ANSYS CFX software which is based on the numerical solution of differential three-dimensional Navier – Stokes equations the calculation of the flow which is formed in the room under various initial conditions was made. As a result of the research it was determined that maximum values of velocity in the reverse flow are not under the jet as it was thought but at the corners of the room. It was also determined that velocity values depend on the height of installation of the inlet opening and maximum difference is 20%. The results of the calculation of flow for different types of air diffusers showed that there is considerable influence of kinematic coefficient m of the air diffuser on the value of velocity in the reverse flow. Realization of series of numerical research using methods of mathematical planning of experiment allowed to develop method of calculation of the reverse flow parameters depending on the type of supply air diffuser.

Keywords: room conditioning, numerical simulation, turbulent flow, Navier-Stokes equations, air distribution

При подаче воздуха стесненной струей выше рабочей зоны формируется обратный поток, который определяет параметры микроклимата в помещении. Воздухораспределение стесненными струями эффективно для помещений высотой более 4 м, таких как: производственные помещения; складские комплексы; общественные помещения, например вестибюли аэропортов.

При этом ни одна из существующих методик [3, 5, 7] не учитывает влияния видового разнообразия существующих на сегодняшний день воздухораспределительных устройств на параметры обратного потока, формируемого в рабочей зоне. Таким образом, определение зависимости скорости в обратном потоке от вида воздухораспределительного устройства является актуальной задачей.

В данной статье приведены результаты исследований методами численного экс-

перимента [11] течений, формирующихся в объеме помещения при подаче приточного воздуха стесненной струей выше рабочей зоны с помощью различных воздухораспределительных устройств. Для выведения искомой зависимости для скорости в обратном потоке использованы методы математического планирования эксперимента.

## Материалы и методы исследования

Инструментом исследования в настоящей работе является гидродинамический вычислительный комплекс ANSYS CFX (бессрочная лицензия ООО «Арктос»), основанный на численном решении трехмерных дифференциальных уравнений сохранения [4].

Уравнения, описывающие течение в объеме рассматриваемого помещения (1)–(4), аналогичны [6].

Уравнение сохранения массы:

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i} = 0 \; ; \tag{1}$$

- уравнение сохранения импульса:

$$\rho \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_k} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} \right) = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_i} , \quad (2)$$

где  $R_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'}$  тензор Рейнольдсовых напряжений, где  $\rho$  – плотность воздуха;  $\overline{u_i}$  – компоненты скорости осредненного потока; t – время.

Для замыкания уравнения движения использовалась модель турбулентности: «стандартная» k- $\varepsilon$  молель [9]:

- уравнение переноса кинетической энергии турбулентности k:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_{j}}(\rho U_{j}k) =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{k}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_{j}} \right] + P_{k} - \rho \varepsilon + P_{kb}$$
(3)

– уравнение диссипации  $\varepsilon$  кинетической энергии:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_{i}}(\rho U_{j}\varepsilon) =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_{j}} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon l} P_{k} - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon l} P_{\varepsilon b}), (4)$$

где k — кинетическая энергия турбулентности;  $\epsilon$  — скорость диссипации кинетической энергии турбулентности;  $\mu_{\rm t}$  — турбулентная вязкость;  $C_{\rm el}$  = 1,44,

 $C_{\varepsilon^2}=1,92,\ \sigma_{\rm k}=1,\sigma_{\varepsilon}=1,3$  — полуэмпирические коэффициенты.

Адекватность расчетов данным методом подтверждена сравнением результатов численного и натурного экспериментов [8] и [10].

#### 1. Постановка задачи

На рис. 1 представлена геометрия помещения, используемая при проведении численного исследования.

В табл. 1 приведены основные параметры решаемой залачи.

## Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 представлено поле распределения компоненты скорости по оси X в поперечном сечении помещения. Плоскость поперечного сечения расположена на расстоянии 12 м от истечения в том месте, где наблюдается максимальное значение скорости в обратном потоке. Положительные значения компоненты скорости соответствуют прямому потоку, отрицательные — обратному потоку.

Результаты расчета трехмерного течения показали, что максимальные значения скорости в обратном потоке (ОП) наблюдаются в углах помещения (рис. 2). При этом максимальная скорость в углах помещения примерно на 70% больше максимальной скорости в обратном потоке в продольной плоскости симметрии помещения (табл. 2).

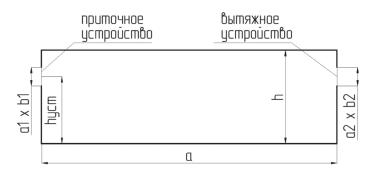
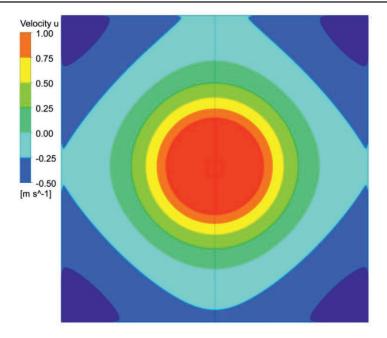


Рис. 1. Разрез помещения

## Параметры исследования

Таблица 1

Размеры помещения $a \times b \times h$	76 m × 8 m × 8 m
Высота установки приточного устройства от пола до его центра $h_{_{ m ycr}}$	от 4 м до 9,95 м
Размеры приточного устройства $a_1 \times b_1$	от $100 \text{ мм} \times 100 \text{ мм}$ до $1000 \text{ мм} \times 1000 \text{ мм}$
Размеры вытяжного устройства $a_2 \times b_2$	Соответствуют приточному
Скорость приточного воздуха $V_0$	5 м/с, 7 м/с или 10 м/с
Параметр поперечного стеснения $\sqrt{F_0/F_\Pi}$ (отношение площади приточного отверстия к площади поперечного сечения помещения)	от 0,0125 до 0,125



 $Puc.\ 2.\ Поле\ pacnpedeлeния\ компоненты\ скорости\ V_{_{_{Y}}}$ в поперечном сечении помещения с максимальной скоростью в обратном потоке

Таблица 2 Максимальная скорость в обратном потоке  $V_{\text{обр}}^{\text{max}}$ , м/с

Скорость в обратном потоке в плоскости симметрии, м/с		Скорость в обратном потоке в углах помещения, м/с	
Расчет по полуэмпирической формуле	CFD-моделирование	CFD-моделирование	
0,39	0,38	0,65	

Сопоставление значений максимальных скоростей в обратном потоке под струей, полученных в результате численного моделирования и расчета по формуле

$$V_{\text{обр}}^{\text{max}} = 0.78 \cdot V_0 \sqrt{\frac{F_0}{F_{\Pi}}}$$
 [5], применяемой для расчета в настоящее время, представлено в табл. 2. Видно, что отличие составило менее 5%

нее 5%.

Игнорирование превышения скорости в углах помещения по отношению к скорости, полученной расчетным путем, может быть причиной существенных погрешностей в расчетах воздухораспределения при проектировании систем вентиляции и кондиционирования воздуха.

Полученный результат был подтвержден для случаев установки двух и более приточных устройств, когда максимальное значение скорости наблюдается не только в углах, но и в других областях рабочей зоны.

Таким образом, численные расчеты для подобного вида течений следует проводить в трехмерной постановке, так как расчет плоских задач может привести к некорректным результатам.

В результате исследования влияния высоты установки приточного отверстия на параметры обратного потока стесненной струи было определено, что значения максимальных скоростей в зависимости от высоты установки приточного отверстия изменяются до ≈ 20%. Максимальное значение скорости в ОП наблюдается при установке приточного отверстия на высоте  $h_{\text{vcr}} = 0.75h$ , минимальное – при установке по центру или непосредственно под потолком.

На рис. 3 представлено изменение значений скорости в обратном потоке  $(\overline{V} = \frac{V_{0,75\,h} - V}{V} = 100\%$ , то есть в процентах по отношению к максимальному значению) в зависимости от относительной высоты установки приточного отверстия  $\frac{h}{h} = \frac{h_{\rm ycr} - h/2}{h}$ .

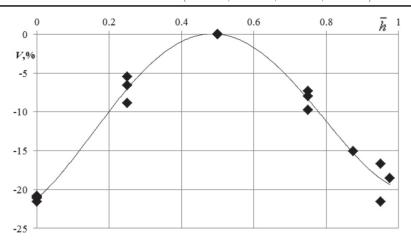


Рис. 3. Изменение скорости в обратном потоке в процентах в зависимости от относительной высоты установки

Таблица 3 Уровни варьирования факторов – Уравнение № 1

Наименование фактора	TP	Кодовое обо- значение	Уровни варьирования	
	Размерност		Нижний $X_i = -1$	Верхний $X_i = +1$
Скорость, $V_0$	м <sup>3</sup> /ч	$X_{1}$	1	7
Кинематический коэффициент, т	_	$X_2$	3,2	6,7
Параметр стеснения, $\sqrt{F_0/F_{\Pi}}$	_	$X_3$	0,0125	0,125

Таблица 4 Уровни варьирования факторов – Уравнение № 2

Наименование фактора	Tb	Кодовое обо-	Уровни варьирования	
	Размернос		Нижний $X_i = -1$	Верхний $X_i = +1$
Скорость, $V_0$	м <sup>3</sup> /ч	$X_{1}$	1	7
Кинематический коэффициент, т	_	$X_2$	6,7	9,5
Параметр стеснения, $\sqrt{F_0/F_\Pi}$	_	$X_3$	0,0125	0,125

Таким образом, отсутствие учета влияния высоты установки на максимальную скорость в обратном потоке также приведет к заметным погрешностям при инженерных расчетах.

Результаты расчета течения для различного вида воздухораспределительных устройств показали наличие существенного влияния кинематического коэффициента m [5] воздухораспределителя на значение скорости в обратном потоке.

Таким образом, основной задачей исследования стало получение зависимости для определения скорости в ОП, которая учитывает вид воздухораспределительного устройства, характеризуемого кинематическим коэффициентом m. Предварительные исследования показали, что степенная зависимость в диапазоне коэффициентов  $m=3,2\div9,5$  имеет большую погрешность, чем две линейные зависимости в диапазонах: от m=3,2 до m=6,7 и от m=6,7 до

m = 9,5 (значение кинематического коэффициента m = 3,2 соответствует решетке с веерным раскрытием ламелей; m = 6,7 — отверстию; m = 9,5 — соплу).

Сложность комплексного изучения течения стесненной струи воздуха, многофакторность и широкий диапазон изменения влияющих параметров вызвали необходимость применения математических методов планирования и обработки эксперимента [1] и [2]. Использование данного метода позволяет варьировать одновременно все факторы и получать количественные оценки основных эффектов и эффектов взаимодействия. А также оценить значимость того или иного фактора.

В табл. 3 и табл. 4 представлены уровни варьирования факторов для Уравнения  $\mathbb{N}_2$  1 и Уравнения  $\mathbb{N}_2$  2.

Основываясь на предположении о том, что искомые зависимости носят линейный характер, для построения матриц экспериментов был выбран ортогональный план первого порядка. Линейное уравнение регрессии, описывающее целевую функцию, запишется в следующем виде:

$$Y = b_{o} + \sum_{j=1}^{k} b_{j} X_{j} + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^{k} b_{ij} X_{i} X_{j},$$
 (5)

где k=3— число факторов;  $X_i$ ,  $X_j$  (i, j=1, k) — кодированные значения факторов;  $b_i$ , — коэффициенты регрессии модели, рассчитываемые по результатам опытов.

В результате формулы для определения скорости в обратном потоке имеют вид:

— Уравнение № 1 для значений  $m = 3.2 \div 6.7$ :

$$V_{\text{oбp}}^{\text{max}} = -0,006 + 0,002V_0 + 0,001m +$$

$$+0,19\sqrt{F_0/F_{II}} - 0,00009V_0m + 0,99V_0\sqrt{F_0/F_{II}} -$$

$$-0,06m\sqrt{F_0/F_{II}} + 0,9V_0m\sqrt{F_0/F_{II}},$$
(6)

— Уравнение № 2 для значений  $m = 6.7 \div 9.5$ :

$$V_{\text{ofp}}^{\text{max}} = 0.001 + 0.003V_0 + 0.002 m -$$

$$-0.47\sqrt{F_0/F_{II}} - 0.0001V_0m - 0.5V_0\sqrt{F_0/F_{II}} - 0.004m\sqrt{F_0/F_{II}} + 0.3V_0m\sqrt{F_0/F_{II}}.$$
 (7)

#### Заключение

Таким образом, проведение серии численных исследований течения стесненной струи с использованием методов математического планирования экспериментов позволило разработать методику расчета параметров формируемого ей обратного потока в зависимости от вида приточного устройства.

Полученные в результате работы зависимости следует использовать при проектировании вентиляции стесненными струями, подаваемыми выше рабочей зоны с помощью различного вида воздухораспределительных устройств.

## Список литературы

- 1. Ахназарова С.Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии [Текст]: учебное пособие для студентов / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1985. 328 с.
- 2. Аэродинамика вентиляции [Текст]: учеб. пособие для студ. учреждений высш. проф. образования / В.И. Полушкин, С.М. Анисимов, В.Ф. Васильев и др. М.: Издательский центр «Академия», 2013. 208 с.
- 3. Батурин В.В. Основы промышленной вентиляции [Текст] / В.В. Батурин 4-е изд., перераб. и доп. М.: Профиздат, 1990.-448 с.
- 4. Гримитлин А.М. Математическое моделирование в проектировании систем вентиляции и кондиционирования [Текст] / А.М. Гримитлин, Т.А. Дацюк, Д.М. Денисихина М.: Издательство «АВОК Северо Запад», 2013. 192 с.
- 5. Гримитлин М.И. Распределение воздуха в помещениях [Текст] / М.И. Гримитлин С-Пб: Издательство «АВОК Северо-Запад», 2004. 320 с.
- 6. Денисихина Д.М. Численное моделирование автоколебательных вентиляционных течений [Текст]: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.05 / Денисихина Дарья Михайловна. — СПб., 2005. — 135 с.
- 7. Кареева Ю. Р. Струйные течение в ограниченных пространствах [Текст]: дис. ... канд. техн. наук 01.02.05 / Ю.Р. Кареева Казань, 2015. 165 с.
- 8. Кочарьянц К.В. Численное моделирование воздухораспределения веерными настилающимися струями. Выбор модели турбулентности / К.В. Кочарьянц // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 4(57). С. 128–133.
  - 9. ANSYS CFX-Pre User's Guide. Release 15.0. November 2013.
- 10. Kochariantc K. Computational Modelling Research into the Efficiency of Recirculation Air Diffusers / V. Shkarpet, I. Tislenko, K. Kochariantc, D. Kapko, Iu. Tabunshchikov // Oriental Journal of Chemistry. 2015. № 31 October. p. 173–179 (SciVerse Scopus).
- 11. Nielsen P.V., Allard F., Awbi H.B., Davidson L. and Schälin, A. // Computational fluid dynamics in ventilation design. REHVA Guide Book 10. RHEVA. 2007.