

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ

А.И. Федюшкин *, А.Г. Чурбанов **

*ФГБУН Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,

**ФГБУН Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН

Во всех жилых и производственных помещениях используются системы вентиляции. Вентиляция может быть естественно-конвективной, принудительно приточной (с использованием дополнительных установок) или смешанной. Естественно конвективная вентиляция является наиболее экономичной и эффективной особенно в условиях, когда температура внутри вентилируемого здания гораздо выше, чем снаружи корпуса. Такие условия часто существуют в производственных помещениях с большими тепловыделяющими установками, например, в литейных цехах, в корпусах электролиза алюминия, в котельных и т.д.

Для выполнения экологических норм и создания комфортных условий при работе людей в производственных корпусах часто требуется увеличивать эффективность естественно-конвективной вентиляции, не прибегая к принудительной вентиляции с дополнительными энергозатратами. Эта необходимость возникает при увеличении мощностей производства и ужесточении экологических норм, например, в цехах металлургических, химических и энергетических производств. Например, в цехах электролиза алюминия существует рабочая зона – это приблизительно 2 метра от уровня пола по всей площади корпуса, в которой температура и концентрация загрязняющих веществ должны быть ниже порогового уровня. Управляя интенсивностью вентиляции, можно обеспечить должный температурный и концентрационный режим в рабочей зоне производственного корпуса.

В производственных корпусах интенсивность и эффективность естественно конвективной вентиляции определяются многими условиями и параметрами. Одними из важнейших факторов для эффективной естественной вентиляции промышленных зданий являются геометрия, форма и конструкция аэрационных фонарей. В данной работе будут представлены результаты математического моделирования, полученные на основе уравнений Рейнольдса для турбулентного течения воздуха, и проанализированы пропускные характеристики основных наиболее известных типов аэрационных фонарей: «ВАМИ», «НН Robertson» «COLT», «GAL» и их модификаций [1, 2]. Данные аэрационные фонари и их модификации применяются для вентиляции больших промышленных помещений, в частности, для вентиляции корпусов электролиза алюминиевой промышленности.

В данной работе показано то, что можно оценить и оптимизировать интенсивность естественно-конвективной вентиляции промышленного корпуса, проанализировав те или иные аэрационные фонари

1. Цель исследований и постановка задачи

В данной работе проводится сравнительный анализ пропускной способности различных аэрационных фонарей при естественно-конвективной вентиляции промышленных зданий с целью выявления наиболее эффективного.

На рис. 1 представлена фотография интерьера типичного цеха электролиза. С аэрационными фонарями серии «ВАМИ». Аэрационные фонари могут устанавливаться, как по всей длине здания, так и на некоторых участках крыши. В цехах электролиза алюминия

основные конвективные потоки воздуха возникают вследствие тепловыделения от десятков электролизеров, расположенных друг за другом по всей длине корпуса. Корпуса электролиза обычно имеют большие размеры: по ширине и высоте около трех десятков метров и протяженностью около километра.



Рис.1. Цех электролиза алюминия аэрационные фонари серии «ВАМИ»

1.1. Типы аэрационных фонарей

В данной работе проанализировано более десяти модификаций аэрационных фонарей из следующих основных типов фонарей: «ВАМИ», «COLT» и «Тюльпан». В табл. 1 представлены электронные геометрические модели аэрационных фонарей на основе литературных данных (см. ссылки на web сайты) были созданы авторами с помощью пакетов программ SolidWorks и Gambit и в дальнейшем использовались в данной работе при моделировании аэродинамики для анализа вентиляции промышленных зданий с различными фонарями. Нумерация, схемы и некоторые характеристики фонарей, рассмотренных в данной работе, представлены в табл. 1, подробнее информацию можно узнать в работе [3].

Таблица 1

1	<p>ОАО «РУСАЛ ВАМИ» www.vami.ru «ВАМИ» №1 («experimental», устье=18.4м, ветроотбойные щиты 90°)</p>	
2	<p>ОАО «РУСАЛ ВАМИ» www.vami.ru «ВАМИ» №2 (устье=12м, ветроотбойные щиты 90°)</p>	
3	<p>ОАО «РУСАЛ ВАМИ» www.vami.ru «ВАМИ» №3 (устье=12м, без ветроотбойных щитов)</p>	
4	<p>ОАО «РУСАЛ ВАМИ» www.vami.ru «ВАМИ» №4 (устье=12м, ветроотбойные щиты 45°)</p>	

5	<p>ОАО «РУСАЛ ВАМИ» www.vami.ru «ВАМИ» №5 (устье=12м, щиты 90⁰, вдув снизу)</p>	
6	<p>ОАО «РУСАЛ ВАМИ» www.vami.ru «ВАМИ» №6 (устье=12м, щиты 90⁰, вдув с 2 боков, без учета пола)</p>	
7	<p>ОАО «РУСАЛ ВАМИ» www.vami.ru «ВАМИ» №7 (устье=12м, щиты 90⁰, вдув с 2 боков, с учетом пола)</p>	
8	<p>Robertson Ventilation International (НИ Robertson) www.robertson.com.hk/RVI/ НИ Robertson Ultra-Flow (RUF)</p>	
9	<p>GAL Industrial Ventilation Solutions GmbH www.gal-ventilation.com Фонарь «Тюльпан - GAL» RIF- A C_D = 0.78 (устье=1 ÷ 4 м)</p>	
10	<p>GAL Industrial Ventilation Solutions GmbH www.gal-ventilation.com Фонарь «Тюльпан – GAL» с вертикальной перегородкой</p>	
11	<p>Zefyr Group НСD www.zefyrgroup.com (C_D> 0.65, устье = 0.75 ÷ 4.8 м)</p>	
12	<p>COLT Group www.coltgroup.com Фонарь «COLT» Labyrinth MK2 (устье=0.75 ÷ 3.75 м)</p>	

Следует отметить, что секции фонаря COLT Labyrinth MK2 могут иметь различную длину, но устанавливаются поперек конька крыши вентилируемого корпуса (то есть не поперек, а вдоль устья шириной в 3м).

1.2. Схемы расчетных областей

Структура основного конвективного течения воздуха в корпусе цеха электролиза алюминия зависит от расположения электролизеров и имеет периодический характер по длине корпуса с периодом равным расстоянию между электролизерами. Поэтому при математическом моделировании, для сокращения времени расчета, в трехмерной математической модели в качестве расчетной области можно взять не весь корпус, а только часть корпуса с одним или двумя электролизерами, как показано на рис. 2. В такой

математической модели на фронтальных и тыльных плоскостях расчетной области ставятся условия периодичности (на рис.2 эти плоскости показаны открытыми).

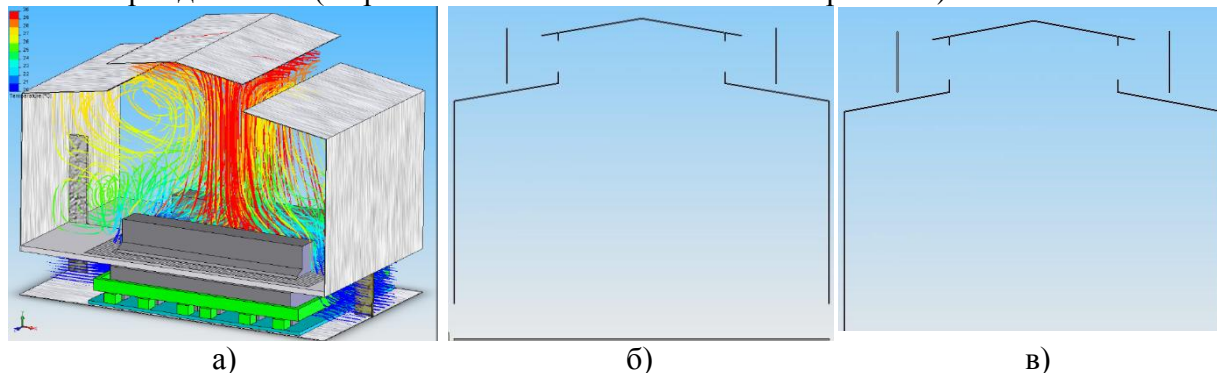


Рис. 2. Модели корпуса электролиза с фонарем «ВАМИ»: а) 3D модель корпуса электролиза а) -2D модель, подачи воздуха с двух боков, в) 2D модель, подачи воздуха снизу

В двумерных (2D) моделях расчетная область представляет вертикальное поперечное сечение корпуса, проходящее через середину электролизера (рис.3). Рассматриваются 2D модели с двумя вариантами входа воздуха в здание: в первом случае воздух поступает горизонтально с боков корпуса (рис.3а), а во втором воздух поступает вертикально снизу-вверх от пола (рис.3б). В обоих случаях воздух за счет конвекции вытекает через аэрационные фонари, установленные на крыше здания, которые имеют различные конструкционные и геометрические особенности. В данной работе во всех моделях предполагается, что вне корпуса внешний поток ветра отсутствует.

Геометрия двумерной базовой модели была следующей: это здание производственного корпуса шириной 27 м, высотой корпуса 19-24м (в зависимости от типа аэрационного фонаря), высота расчетной области 33м, крыша двухскатная с наклоном 1:6. Двумерная базовая модель здания была без электролизера, но с постоянными заданными потоками воздуха, равномерно вдуваемыми через отверстия, расположенные либо сбоку корпуса, как показано стрелками на рис.3а или снизу, как показано на рис.3б. Расчетные сетки для разных геометрий фонарей были, как равномерными, так и неравномерными - адаптивными по геометрии и градиенту скорости.

Моделирование проводилось для разных значений массового расхода воздуха $M = 1, 3, 5, 7$ и 10 кг/с на погонный метр. Этот диапазон значений расхода воздуха был получен, исходя из предварительных численных расчетов полной тепловой задачи с учетом тепловыделений от электролизера в диапазоне $q=100$ до 700 кВт.

2. Математическая модель

При моделировании естественно конвективного течения воздуха в производственном корпусе использовались $k-\varepsilon$ и $k-\omega$ SST (SST - Shear Stress Transport) модели турбулентности с различными пристеночными функциями. Для тестирования адекватности и точности выбранной математической модели о естественной вентиляции помещений с отверстиями и внутренним тепловыделением была рассчитана задача из экспериментальной работы [4]. Математическое моделирование данной тестовой задачи было проведено с использованием различных моделей турбулентности. Лучшее согласие с экспериментальными данными [4] было получено при использовании $k-\omega$ SST модели. В данной работе рассмотрены и

рассчитаны коэффициенты пропускной эффективности для фонарей «ВАМИ», «COLT» и «Тюльпан». Математические модели рассмотренных фонарей представлены в табл. 1.

2.1. Критерий вентиляционной эффективности аэрационных фонарей

В качестве критерия вентиляционной эффективности аэрационного фонаря выбран безразмерный коэффициент истечения C_D (discharge coefficient) либо коэффициента пропускания: $k=1/C_D^2$, характеризующие способность фонаря пропускать воздушный поток и зависящий только от его конструкции. Некоторые производители приводят данные для C_D своих фонарей, полученные из экспериментов (продувка фонарей в трубах) или из CFD расчетов. Коэффициент истечения C_D позволяет для заданной конфигурации корпуса и тепловой нагрузки приближенно вычислять пропускную способность конкретного фонаря Q (по формулам из руководства ASHRAE - гидростатическое приближение без учета конвекции) [5].

Коэффициент истечения C_D характеризует пропускную способность аэрационного фонаря (на единицу площади входа) при заданной величине перепада давления ΔP :

$$Q = C_D (L_{throat} H) \sqrt{2\Delta P / \rho} \quad (1)$$

где Q – объемный расход через фонарь, $S=L_{throat} H$ - площадь входного проточного сечения (произведение ширины устья L_{throat} на длину фонаря H), ΔP – вытяжка (перепад давления через фонарь), ρ – плотность воздуха. Аэрационные фонари могут устанавливаться по всей длине здания. Длина фонаря H может равняться практически длине корпуса, а может быть гораздо меньше, это зависит от типа фонарей и конкретного расположения фонарей. Величина C_D изменяется в диапазоне: $0 \leq C_D \leq 1$, причем, $C_D = 0$ – это случай, когда нет отверстия, а $C_D = 1$ - это случай, когда наверху здания сплошное отверстие без крыши и фонаря. Произведение $C_D \cdot L_{throat}$ в уравнении (1) характеризует эффективность (пропускную способность) фонаря и позволяет сравнивать фонари разных типов при работе в одинаковых условиях без привязки к конкретному корпусу завода, то есть, когда $H\sqrt{2\Delta P / \rho} = const$.

В данной работе значение коэффициента истечения C_D через аэрационный фонарь определялось с помощью моделирования турбулентного конвективного течения воздуха в корпусе электролиза и за пределами фонаря на основе численного решения уравнений Рейнольдса. Были рассмотрены модели с различными типами аэрационных фонарей, а также случаи без наличия фонаря на крыше корпуса (то есть с отверстием на месте фонаря), эти случаи будем в дальнейшем называть словом «устье» без указания типа фонаря, но с указанием ширины отверстия на крыше.

3. Результаты математического моделирования

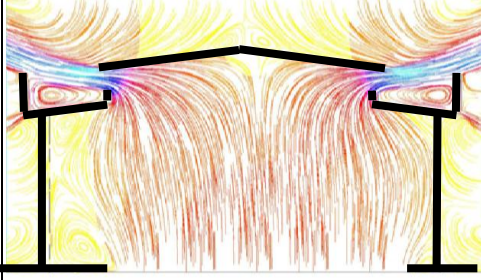
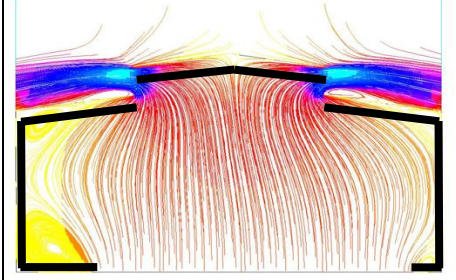
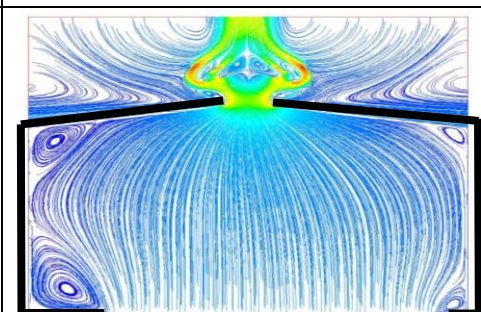
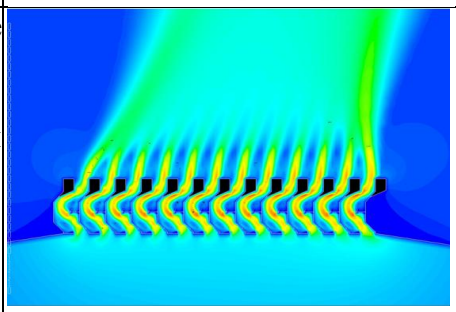
Интенсивность естественной конвекции воздуха в корпусе электролиза определяется мощностью тепловыделения от стенок электролизера, размерами корпуса и типом аэрационных фонарей. Тепловыделение от каждого из электролизеров может достигать сотен киловатт и температура в рабочей зоне без вентиляции может превышать допустимые нормы.

Для определения значений среднего объемного расхода воздуха Q , возникающего в секции корпуса вследствие конвекции от тепловыделяющего электролизера, при характерных значениях тепловыделения были проведены численные расчеты конвективного теплообмена в 3D постановке с использованием модели, представленной на рис. 2. На рис 2 показаны траектории отмеченных частиц в объеме (а) и поле вектора скорости в среднем сечении (б), окрашенные в соответствии со значениями температуры. Данный расчет проведен при тепловыделении от электролизера, равном $q = 702$ кВт.

3.1. Структура течения воздуха в промышленных корпусах

Результаты численного моделирования показаны на рисунках, включенных в табл. 2. Нумерация рисунков в табл. 2 соответствует номерам моделей фонарей, представленных в табл. 1 (рисунки сжаты по вертикали). Картины течения воздуха через аэрационные фонари показывают влияние особенностей конструкций фонарей и расположения ветроотбойных щитов на образование вторичных вихрей и дополнительное сопротивление потока воздуха.

Таблица 2.

«ВАМИ» №1 (experimental, устье =18.4м)		«ВАМИ» №3 (устье=12м, без щитов)	
№8. Фонарь НН Robertson Ultra-Flow (RUF)		№12. Течение через фонарь COLT (увеличенная область 2D модели фонаря COLT)	

Эффективность вентиляционных фонарей показана на рис.3 в координатах ("расход-давление"). Сравнение данных зависимостей $P(Q)$ показывает, что перепад давления зависит от типа фонаря и увеличивается при увеличении расхода воздуха, проходящего через корпус. Наибольший перепад давления в корпусе создается при наличии низкопрофильных фонарей типа COLT, а наименьший перепад давления при отсутствии фонарей, т.е. при отверстии с «устьем» в 12м. Данные зависимости показывают, что величина коэффициента пропускания C_D зависит от типа фонаря и слабо зависит от потока воздуха и таким образом может быть хорошей характеристикой конструктивных аэродинамических особенностей фонаря. На рис. 4 представлены в виде диаграмм значения коэффициентов пропускания C_D для различных фонарей, полученные из результатов численного моделирования. Из результатов моделирования можно сделать вывод, что фонари можно ранжировать по возрастанию их эффективности в следующем порядке: «ВАМИ», «COLT», «Тюльпан» Robertson Ultra-Flow (RUF), «Тюльпан» GAL. А наиболее эффективным является аэрационный фонарь «Тюльпан» GAL (RIF-A) без вертикального рассекателя. В каждом классе, из рассмотренных аэрационных фонарей (табл. 1), лучшими с точки зрения максимального пропускания воздуха, являются: 1) среди фонарей типа «ВАМИ» - это «ВАМИ» №7- с устьем равным 12м, с ветрозашитными щитами, стоящими под 90^0 , при входе воздуха в корпус с двух боковых сторон, с учетом пола в модели;

2) среди фонарей группы «COLT» - это низкопрофильный фонарь «COLT» Labyrinth MK2 с устьем 3м (результаты 3D модели);

3) среди фонарей «Тюльпан» - это «Тюльпан» GAL (RIF- A) без вертикального рассекателя воздуха.

Наихудшим с точки зрения пропускания воздуха является аэрационный фонарь ВАМИ № 1 экспериментальный, несмотря на то, что у него устье равно 18.4м.

3.2. Эффективность вентиляционных фонарей

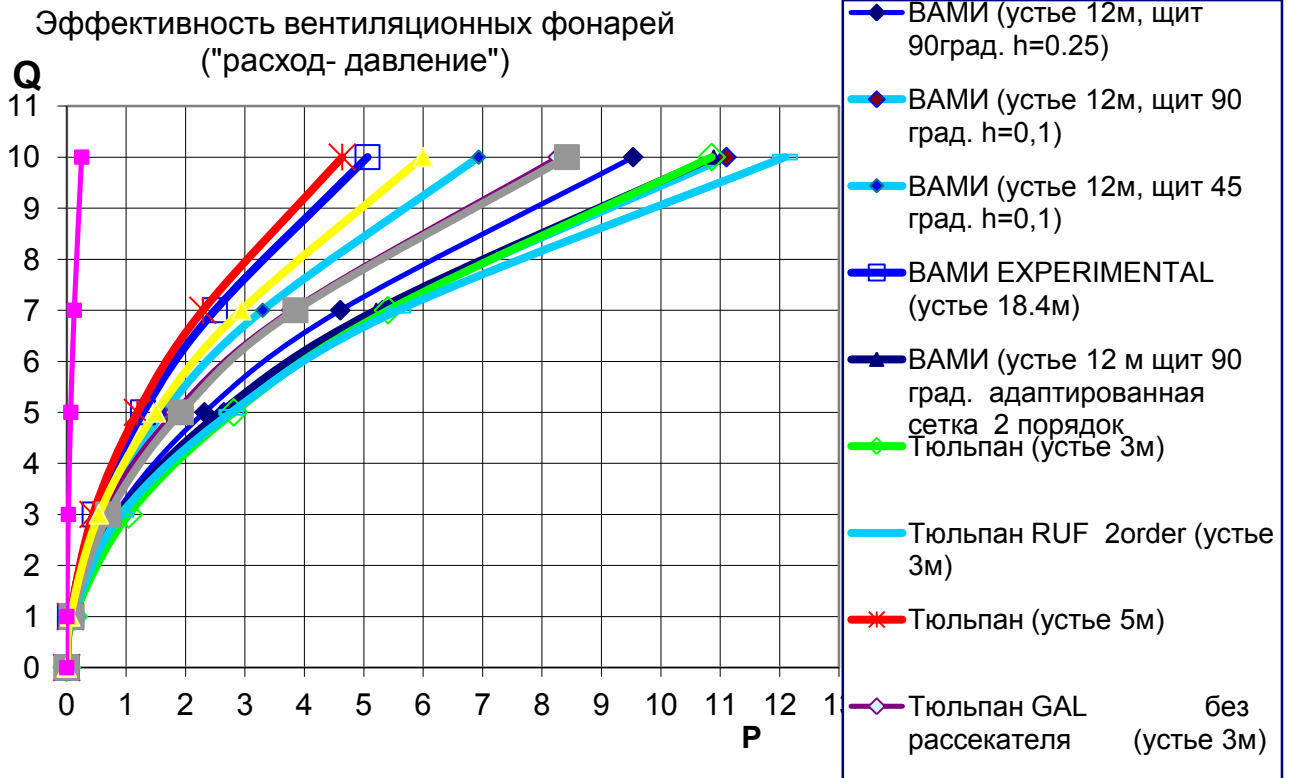


Рис. 3. Эффективность вентиляционных фонарей ("расход- давление")

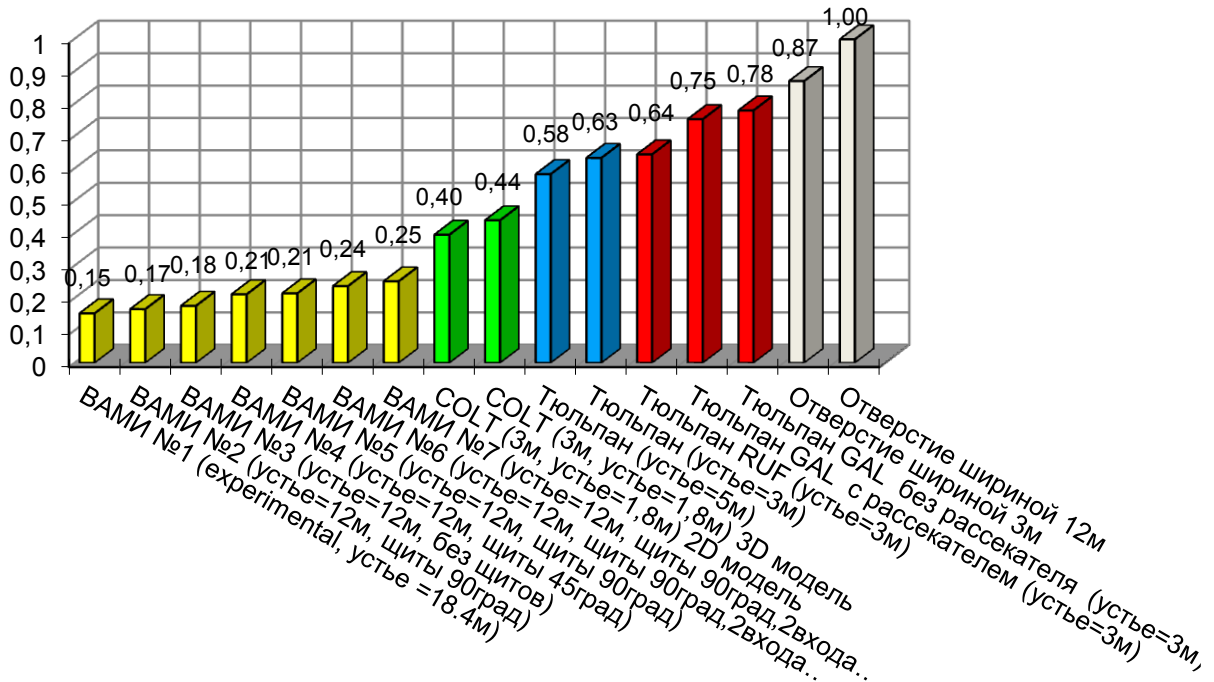


Рис. 4. Коэффициент пропускания C_d для различных типов фонарей

На рис. 4 также показаны значения коэффициента пропускания C_D для двух открытых отверстий (без фонарей) шириной (с «устьем») 3м и 12м, которые равны соответственно 0.8697 и 0.9985. Максимальные значения $C_D=0,77$ из рассмотренных типов фонарей имеет «Тюльпан» GAL.

В табл. 3 приведено сравнение численных и экспериментальных значений коэффициентов пропускания (экспериментальные значения взяты с web-сайтов производителей данных фонарей, указанных в табл. 2). Сравнение с экспериментальными данными показывает хорошую точность численных математических моделей.

Расчеты показали, что пропускная способность аэрационных фонарей по-разному зависит от ширины устья. Например, для достижения одинаковой пропускной способности фонарей ширины устьев под фонарь должны быть следующими: ВАМИ – 12 м, Тюльпан – 3.7м, COLT – $7/0.6=11.6$ м. Таким образом, для достижения определенной пропускной способности можно прогнозировать ширину и конструкцию аэрационного фонаря для вентиляции каждого конкретного промышленного корпуса.

Таблица 3.

Тип фонаря	C_D	
	Численный расчет	Эксперимент
«ВАМИ» №7	0.25	
«COLT»	0.4	$0.24/0.6=0.4$
«Тюльпан» HH Robertson Ultra-Flow	0.63	0.65
«Тюльпан» GAL (RIF- A)	0.77	0.78

Выводы

Результаты математического моделирования показали, что фонари типа «Тюльпан» обладают большим значением C_D (на единицу площади), чем фонари «COLT» и «ВАМИ».

Зная C_D , например, из результатов математического моделирования, можно прогнозировать (не привязываясь к конкретному промышленному корпусу), какие фонари (геометрия + ширина устья) обладают одинаковой пропускной способностью, и выбрать из них наиболее эффективный с учетом других технико-экономических показателей.

Математическое моделирование показало, что одинаковая пропускная способность может быть у следующих фонарей, но с различной шириной устья, например: «ВАМИ» (12м) = «Тюльпан GAL» (3.7м) = «COLT» (11.6м)

Литература

1. Соловей Ю.М. Основы строительного дела./ Ю.М. Соловей -М.: - Стройиздат, 1989г. - 429с
2. Zefyr Group, - Top Barn Business Centre, Holt Heath, Worcestershire, - United Kingdom, Сетевой ресурс: www.zefyrgroup.com.
3. Федюшкин А.И. Анализ пропускной эффективности различных типов аэрационных фонарей при вентиляции промышленных зданий. / А.И. Федюшкин, А.Г. Чурбанов. - Препринт ИПМех РАН, -№ 1093, -Москва, 2015, -54 с. ISBN 978-5-91741-136-1. Сетевой ресурс: <http://www.ipmnet.ru/~fai/public-r.htm>
4. Ergin-Ozkan S.. Experimental study of natural convection between two compartments of a stairwell./ S.Ergin-Ozkan, M.R. Mokhtarzadeh-Dehghan, A.J. Reynolds.// Int. J. Heat Mass Transfer, -38, -1995. -p,2159-2168.
5. ASHRAE Handbook - HVAC: Systems and Equipment, -2008, -320 p.

Информация об авторе: Федюшкин Алексей Иванович – к.ф.-м.н, с.н.с., Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, 119526, Москва, Россия, тел.:+7 (495) 4333497, E-mail fai@ipmnet.ru