

УДК 536.244

## Экспериментальное исследование аэро- и термодинамических процессов в проемах, оборудованных тепловыми завесами

Д-р техн. наук А. Ю. ГРИГОРЬЕВ<sup>1</sup>

канд. техн. наук К. А. ГРИГОРЬЕВ<sup>2</sup>, А. Я. БРАЙНИН<sup>3</sup>

<sup>1</sup>augrig@bk.ru, <sup>2</sup>kagrig@bk.ru, <sup>3</sup>andrej\_brajnin@bk.ru

Университет ИТМО

Институт холода и биотехнологий

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

**Проблема сопоставления и выбора воздушных тепловых завес (ВТЗ) всегда возникает при проектировании систем жизнеобеспечения помещений с открытыми проемами.**

**Повышение требований к данному виду оборудования вынуждает не только разрабатывать современные методики расчета аэро- и термодинамических процессов в проемах с ВТЗ, но и проводить детальное экспериментальное изучение течения воздуха в проеме, в том числе и для проверки на адекватность вновь создаваемых математических моделей.**

**В работе приводятся результаты экспериментальных исследований аэро- и термодинамических процессов в проемах, оборудованных горизонтальными ВТЗ с нагревом малой (3 кВт и расходом 400 м<sup>3</sup>/ч) и средней (6 кВт и расходом 1000 м<sup>3</sup>/ч) мощности. Подробно описан экспериментальный стенд. Установлена погрешность проводимого исследования. Сделан вывод о возможности установки исследуемых ВТЗ при различных проемах и внешних аэро- и термодинамических условиях.**

**Ключевые слова:** воздушная тепловая завеса, аэро- и термодинамические параметры, экспериментальный стенд.

### A pilot study of aero- and thermodynamic processes in the apertures equipped with heated air curtains

D. Sc. A. Yu. GRIGORYEV<sup>1</sup>, Ph. D. K. A. GRIGORYEV<sup>2</sup>,

A. Ya. BRAJNIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>augrig@bk.ru, <sup>2</sup>kagrig@bk.ru, <sup>3</sup>andrej\_brajnin@bk.ru

University ITMO

Institute of Refrigeration and Biotechnologies

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

**The problem of comparing and selecting heated air curtains (HAC) always springs up while designing life support systems for the rooms with open apertures.**

**Growing requirements to this kind of equipment compel the designers to not only develop modern methods of calculating aero- and thermodynamic processes for HAC-equipped apertures but also carry out detailed experimental studies of the air flow in such aperture for different purposes, including the testing of new mathematical models for adequacy.**

**This work presents the results of experimental research on aero- and thermodynamic processes in the apertures with horizontal HAC having low (3 kW, discharge 400 m<sup>3</sup>/h) and medium (6 kW, discharge 1000 m<sup>3</sup>/h) heating capacity. The experimental test bench is described in detail, and the error for the conducted research has been identified. The studied HAC may be installed in any apertures under variable aero- and thermodynamic conditions of the environments.**

**Keywords:** heated air curtain, aero- and thermodynamic parameters, experimental test bench.

Проблема сопоставления и выбора воздушных тепловых завес (ВТЗ) всегда возникает при проектировании систем жизнеобеспечения помещений с открытыми проемами. Актуальность решения этой задачи обусловлена появлением в настоящее время на российском рынке относительно большого количества сертифицированных ВТЗ, как отечественного, так и зарубежного производства.

Повышение требований к энергоэффективности [1, 2] и надежности [3] данного вида оборудования вынуждает не только разрабатывать современные, более точные, методики расчета аэро- и термодинамических процессов в проемах с ВТЗ [4–7], учитывающих нестационарные поля скоростей и температур воздуха, но и проводить детальное экспериментальное изучение течения воздуха в проеме, в том числе и для проверки на адекватность вновь создаваемых математических моделей.

В настоящей работе приводятся данные по экспериментальным исследованиям аэро- и термодинамических процессов в проемах, оборудованных горизонтальными ВТЗ с нагревом малой (3 кВт и расходом 400 м<sup>3</sup>/ч) и средней (6 кВт и расходом 1000 м<sup>3</sup>/ч) мощности.

Так как при проведении эксперимента необходимо учесть все факторы, действующие на ВТЗ, проем и помещение в целом, а так же все варианты установки и работы завесы, включая угол поворота жалюзи, был принят ряд технических решений, направленных на реализацию эксперимента с условиями, максимально приближенными к реальной работе ВТЗ в проеме.

В ходе эксперимента были реализованы две зоны, разделенные проемом с ВТЗ, — помещения 1 и 2, в которых была возможность задавать и поддерживать различную температуру (рис. 1). Сама ВТЗ была установлена на системе профилей с возможностью изменения высоты

установки агрегата, а так же угла поворота жалюзи. Имитация ветрового давления создавалась за счет установки в одном из помещений осевого вентилятора.

Для измерения температуры воздуха по профилю течения был применен измерительный комплекс, в который входили температурные датчики Honeywell HEL 705-U-1, считывающий блок, аналогово-цифровой преобразователь L-Card E14-140, ПК с компьютерной программой L-Graph. Замеры скорости воздуха производились термоанемометрами ТАМ-1 и ЭПМ.

Последовательность проведения испытаний выглядит следующим образом:

1. Перед запуском ВТЗ устанавливаются необходимые в каждом конкретном варианте температурные уровни в помещениях 1 и 2 (при помощи кондиционера или тепловой пушки, в зависимости от заданных граничных условий). Замеряется температура воздуха на границе области замера температуры и скорости течения воздуха, находящейся в середине проема (см. рис. 1).

2. Включается ВТЗ в зависимости от конкретного варианта (с подогревом или без подогрева).

3. Производятся замеры скорости  $V_{\text{вых}}$  и температуры  $T_{\text{вых}}$  на срезе воздуховыпускной решетки ВТЗ.

4. Замеряются скорости течения  $V$  и температуры  $T$  воздуха в по всей области в узлах условной сетки.

5. Отключается ВТЗ.

6. Повторно измеряются температуры на границе области замера температуры и скорости течения воздуха расчетной зоны и по сечению проема, для учета изменения параметров микроклимата в помещении, где установлен агрегат.

Основной задачей физического эксперимента является измерение численных значений скорости течения и температуры воздуха в сечении, перпендикулярном плоскости проема и проходящем через середину проема. Результаты измерений всегда содержат погрешность. Поэтому в задачу экспериментальных исследований входит не только нахождение численных значений величины, но также и оценка допущенной при измерении погрешности. Абсолютной погрешностью экспериментально полученного параметра является разность между полу-

ченным в результате измерений и его точным значением. При этом ни точное значение, ни абсолютная погрешность неизвестны и подлежат оценке по результатам измерений. Относительной погрешностью параметра называется отношение абсолютной погрешности приближенного числа к величине параметра. Если оценка погрешности результата физического измерения не сделана, то измеряемая величина вообще неизвестна, поскольку погрешность может быть того же порядка, что и сам измеряемый параметр.

Для оценки случайной погрешности измерения воспользуемся наиболее распространенным способом оценки с помощью стандартной или средней квадратичной погрешности.

Систематическая погрешность, как правило, указана в паспорте или на шкале прибора. В нашем случае:

1. Термоанемометр ТАМ -1:

- по каналу скорости — 0,02 м/с;
- по каналу температуры — 0,1 °С.

2. Анемометр АПМ — 0,15 м/с.

3. Датчики Honeywell — 0,1 °С.

### Расчет погрешности измерения скорости течения воздуха в струе завесы

Исходные данные:

Замеры, проведенные на срезе воздуховыпускной решетки завесы «Мини-3».

$V_1 = 3,65$  м/с,  $V_2 = 3,60$  м/с,  $V_3 = 3,80$  м/с. Количество замеров  $n = 3$ .

Тогда за оценку истинного значения результата измерений принимаем среднее арифметическое значение:

$$\langle x \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \approx 3,68.$$

Определяем погрешность измерений:  $\Delta x_i = \langle x \rangle - x_i$ .

№	$x_i$	$\Delta x_i$	$\Delta x_i^2$
1	3,65	0,03	0,0009
2	3,6	0,08	0,0064
3	3,80	-0,12	0,0144

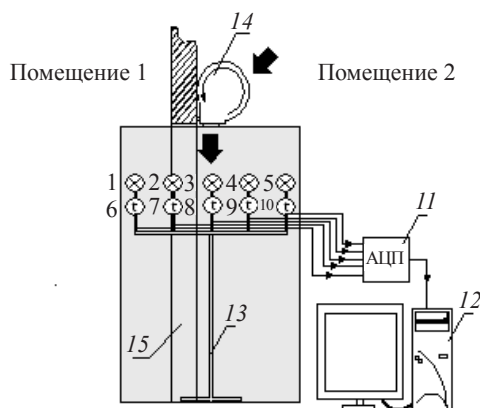
Средняя квадратичная погрешность с учетом данных эксперимента определяется выражением:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\langle x \rangle - x_i)^2}{n-1}} \approx 0,1.$$

Средняя квадратичная погрешность среднего арифметического  $S$  равна средней квадратичной погрешности отдельного результата измерений  $S_n$ , деленной на корень квадратный из числа измерений  $n$ , то есть

$$S_n = \frac{S_n}{\sqrt{n}} \approx 0,06.$$

Из таблицы Стьюдента с учетом того, что экспериментальное измерение параметра производилось  $n = 3$  раза, и  $\alpha = 0,95$  (в этом случае с надежностью 95% можно утверждать, что истинное значение величины  $x_{\text{ист}}$  не отличается от оценки больше, чем на  $\pm x_{\text{ст}}$ ), получаем коэффициент Стьюдента  $t_{\alpha, n} = 4,33$ .



□ — Область замера температуры и скорости течения воздуха

Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1–5 — точки замера скоростей; 6–10 — точки замера температуры; 11 — аналогово-цифровой преобразователь; 12 — компьютер; 13 — координатник; 14 — воздушно-тепловая завеса; 15 — проем

Определяем доверительный интервал:

$$\Delta x_{\text{сл}} = t_{\alpha,n} S = 0,25$$

Приборная погрешность (систематическая погрешность) известна:  $\Delta x_{\text{сист}} = 0,15$ .

Абсолютная погрешность:

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{сл}}^2 + \Delta x_{\text{сист}}^2} = 0,29$$

Относительная погрешность:  $E = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} \cdot 100\% \approx 8\%$ .

Расчет погрешности измерений температуры воздуха в струе завесы проводится аналогично. Замеры температуры дали результаты:  $t_1 = 31,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_2 = 32,7 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_3 = 32,9 \text{ }^\circ\text{C}$ . Тогда  $S = 0,31$ ,  $\Delta x = 1,33$ , а относительная погрешность  $E \approx 4\%$ .

Полученные величины относительной погрешности и при измерении скорости течения, и при измерении температуры воздуха в струе позволяют считать, что результаты эксперимента достаточно близки к истинным. Вместе с тем надо помнить, что с уменьшением по абсолютной величине измеряемого параметра случайные погрешности растут, в нашем эксперименте это особенно касается измерения скоростей течения воздуха в проеме.

Для экспериментальных исследований были выбраны несколько вариантов установки и режимов работы ВТЗ, в том числе симметричные и несимметричные варианты задачи, на разных высотах  $h$  установки ВТЗ.

### Симметричные варианты задачи

При симметричных вариантах: температура в разделенных помещениях примерно одинакова и угол отклонения воздушного потока из завесы от вертикали равен нулю, отсутствует ветровое давление.

Как видно из приведенных диаграмм (рис. 2, 3), картина температур имеет ожидаемый почти симметричный характер. Имеющееся небольшое отличие от симметричности объясняется наличием небольшой разницы температур воздуха в помещениях 1 и 2. Однако симметричные условия работы ВТЗ на практике встречаются крайне редко.

### Несимметричные варианты задачи

Для приближения к реальным условиям для ВТЗ малой мощности в проеме изменим температуру в одном из помещений.

Как видно из рис. 4, в случае несимметричных граничных условий по температуре, холодный, а поэтому имеющий большую плотность воздух из первого помещения вытесняет по низу в сторону второго теплого помещения более теплый с меньшей плотностью воздух из струи. Тепловая завеса в этом случае выполняет задачу перекрытия проема от проникновения холодного воздуха в теплое помещение, так как только по низу, на глубину 0,35 м и высоту 0,2 м, в теплом помещении появляется зона с температурой воздуха существенно ниже средней по всему помещению. В остальной зоне теплого помещения температура воздуха близка средней, до начала эксперимента.

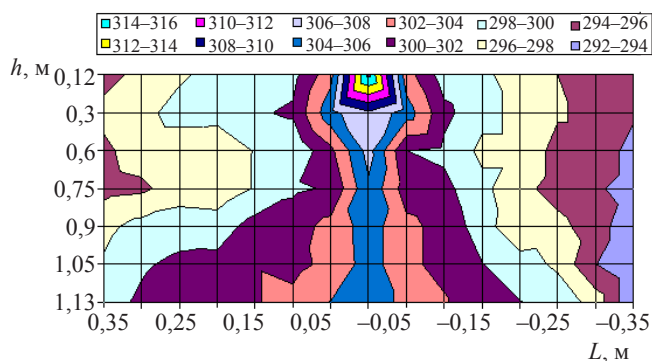


Рис. 2. Температура воздуха в проеме при установке ВТЗ малой мощности ( $h = 1,2 \text{ м}$ ;  $V_{\text{вых}} = 4,6 \text{ м/с}$ ;  $T_{\text{вых}} = 316,2 \text{ К}$ ;  $T_{\text{пом1}} = 293,4 \text{ К}$ ;  $T_{\text{пом2}} = 291,8 \text{ К}$ )

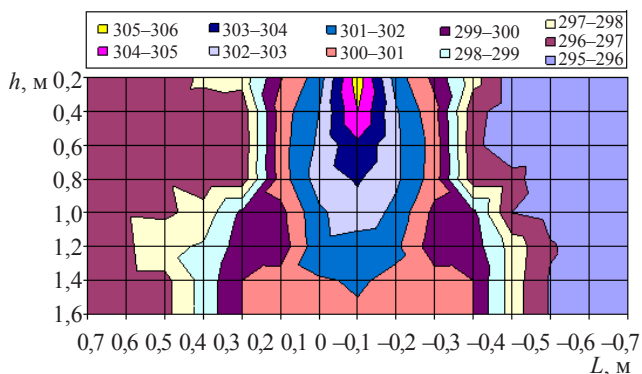


Рис. 3. Температура воздуха в проеме при установке ВТЗ средней мощности ( $h = 1,6 \text{ м}$ ;  $V_{\text{вых}} = 7,0 \text{ м/с}$ ;  $T_{\text{вых}} = 305,7 \text{ К}$ ;  $T_{\text{пом1}} = 295,4 \text{ К}$ ;  $T_{\text{пом2}} = 296,7 \text{ К}$ )

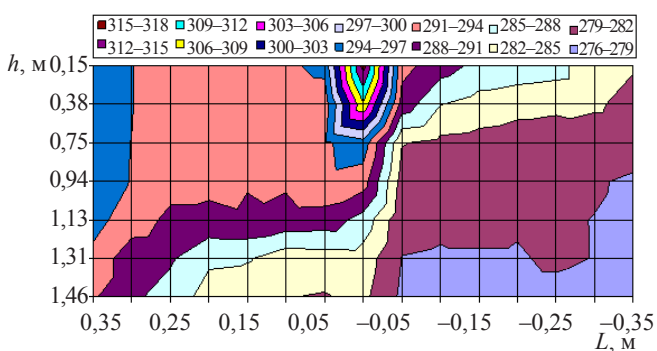


Рис. 4. Температура воздуха в проеме при установке ВТЗ малой мощности ( $h = 1,5 \text{ м}$ ,  $V_{\text{вых}} = 4,6 \text{ м/с}$ ,  $T_{\text{вых}} = 316,1 \text{ К}$ ;  $T_{\text{пом1}} = 295,5 \text{ К}$ ,  $T_{\text{пом2}} = 277,1 \text{ К}$ )

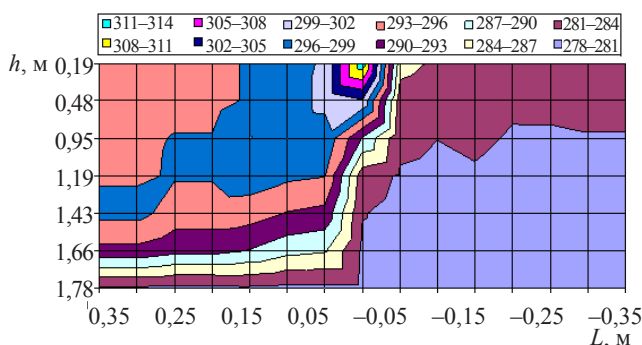


Рис. 5. Температура воздуха в проеме при установке ВТЗ малой мощности ( $h = 1,9 \text{ м}$ ,  $V_{\text{вых}} = 4,6 \text{ м/с}$ ,  $T_{\text{вых}} = 314,6 \text{ К}$ ;  $T_{\text{пом1}} = 296,5 \text{ К}$ ,  $T_{\text{пом2}} = 279,3 \text{ К}$ )

Тепловая завеса малой мощности (рис. 5), установленная в проеме высотой  $h = 1,9$  м с примерно такими же, как на рис. 4 параметрами воздуха в помещениях не решает задачу перекрытия поступления холодного воздуха в теплое помещение, так как по нижней части проема имеется устойчивая зона поступления холодного воздуха.

### Список литературы

1. Цыганков А. В., Белоглазова А. С. Комплексная оценка эффективности систем кондиционирования воздуха в помещениях жилых зданий. // Вестник Международной академии холода. 2011. №4. С. 33–36.
2. Цыганков А. В., Гримитлин А. М. Состояние и перспективы развития систем кондиционирования воздуха. // Вестник Международной академии холода. 2013. №4. С. 47–51.
3. Войнов К. Н., Балесный Ю. В., Самойлова Е. В., Черток Е. В. Применение современных технологий на железнодорожном транспорте. // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2009. №3. С. 63–74.
4. Григорьев А. Ю. и др. Постановка задачи моделирования Аэро- и термодинамических процессов в проемах, оснащенных тепловыми завесами. // Известия СПбГУНиПТ. 2008. №2, с. 44–46.
5. Григорьев А. Ю., Рубцов И. А. Аэро- и термодинамические процессы в проемах, оборудованных тепловыми завесами. // Вестник Международной академии холода. 2011. №4. с. 24–26.

6. Григорьев А. Ю., Рубцов И. А., Шилец А. А. Моделирование пусковых режимов работы тепловой завесы. // Вестник Международной академии холода. 2012. №3. С. 32–35.

7. Григорьев А. Ю., Шилец А. А. Краткосрочные режимы работы воздушных тепловых завес. Научные труды VI Международной НТК «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». — СПб, 2013. С. 187–190.

### References

1. Tsygankov A. V., Beloglazova A. S. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2011. No 4. pp. 33–36.
2. Tsygankov A. V., Gritmitlin A. M. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2013. No 4. pp. 47–51.
3. Vojnov K. N., Balesnyj Ju. V., Samojlova E. V., Chertok E. V. *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija*. 2009. No 3. pp. 63–74.
4. Grigoryev A. Ju. at all. *Izvestija SPbGUNiPT*. 2008. No 2, pp. 44–46.
5. Grigoryev A. Ju., Rubcov I. A. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2011. No 4. pp. 24–26.
6. Grigoryev A. Ju., Rubcov I. A., Shilets A. A. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2012. No 3. pp. 32–35.
7. Grigoryev A. Ju., Shilets A. A. *Kratkosrochnye rezhimy raboty vozdushnyh teplovyh zaves*. Nauchnye trudy VI Mezhdunarodnoj NTK «Nizkotemperaturnye i pishhevye tehnologii v XXI veke». — SPb, 2013. pp. 187–190.



### EXPORT TO EAST & CENTRAL AFRICA

## KENYA FOODEX 2014 International Trade Exhibition 26 - 28 June 2014 - KICC - Nairobi

### Exhibitor Profile

- » Food & Beverages
- » Bakery & Equipment
- » Agriculture
- » Packaging
- » Display & Storage
- » Hotel & Supplies
- » Poultry
- » Kitchen Equipment
- » Sweets & Candies
- » Dairy Products

Kenya Foodex achieved a total number of 75 International and national exhibitors from 25 countries showcasing their company profiles and services. Kenya Foodex hosted a total number of 8,747 attendees that consisted of national and international visitors coming from East African counties. Moreover, the event attracted 18 official delegates from 12 counties.