

УДК 536.3

## О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИХРЕВОГО ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Докт. техн. наук, проф. **НЕСЕНЧУК А. П.**, канд. техн. наук **РЫЖОВА Т. В.**,  
магистр техн. наук **КАЧАР И. Л.**, инженеры **ШКЛОВЧИК Д. И.**, **ПРОКОПЕНКО С. И.**,  
студ. **БЕГЛЯК В. В.**

*Белорусский национальный технический университет,  
ОАО «Минский автомобильный завод»*

Анализ эксплуатационных возможностей вихревых теплогенераторов (вихревых насосов (ВН)), выполненный в работах чл.-кор. НАН Украины, докт. техн. наук, проф., зав. отделом высокотемпературной термогазодинамики Института технической теплофизики НАН Украины А. А. Халатова, позволяет сделать выводы [1]:

- основными преимуществами вихревого теплогенератора являются: компактность (рис. 1), исключительная простота устройства, взрыво- и пожаробезопасность, автономность работы в автоматическом режиме;
- возможность работы с малыми объемами неподготовленных жидкостей (техническая вода) позволяет широко применять их при организации теплоснабжения мобильных объектов (медицинские хирургические госпитали и др.), работающих в условиях чрезвычайных ситуаций, и при однократном использовании (после свертывания деятельности объекта их оставляют на месте прежней дислокации).

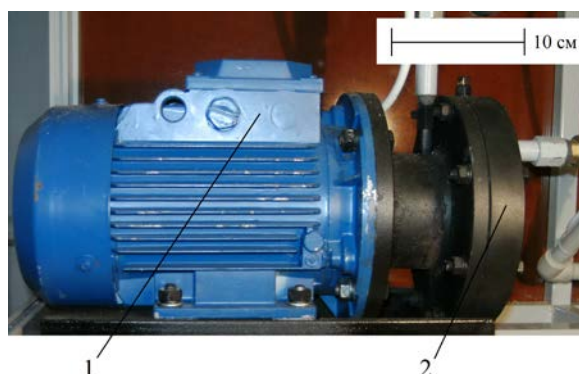


Рис. 1. Общий вид вихревого теплогенератора ВТГ-2,2: 1 – электрический привод, запитанный от дизель-генератора БТР-82; 2 – вихревой насос ВТГ-2,2

Повышенными требованиями к таким объектам объясняется актуальность абсолютно независимого источника первичной энергии, в качестве которого может служить 100-сильный дизель-генератор БТР-82 (сегодня БТР-82 – на вооружении российской армии).

Помимо отмеченных характеристик, вихревые теплогенераторы обладают достаточно высоким коэффициентом полезного преобразования электрической формы движения материи в теплоту, так как, в конечном итоге, преобразование направлено в сторону диссипации (вначале электрической, а затем механической). Как показали выполненные авторами эксперименты, он составил 50–90 %, что при отмеченных выше достоинствах можно считать вполне удовлетворительной характеристикой схемы (по данным [1], эта цифра составляет 93–96 %).

Что касается работ [2–7], в которых рассматривается двойное преобразование «электрическая форма движения материи – механическая форма движения материи – теплота» с коэффициентом преобразования  $\eta > 1$ , то они грешат точностью эксперимента либо определенным непониманием процессов преобразования и недостаточной осведомленностью в области теплообмена при существенных числах  $Re$  [8]. Так, процесс перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный на плоской поверхности происходит в результате самопроизвольного случайного возникновения турбулентных пятен (пятно Эммонса), размер которых увеличивается пропорционально расстоянию при их движении вниз по потоку со скоростью, составляющей долю скорости свободного потока. При этом пятно имеет характерную стреловидную форму (рис. 2) [8]. На снимке видна распространяющаяся в поперечном направлении от поверхности область загрязнения. В центре пятна число Рейнольдса, рассчитанное по расстоянию от передней кромки, равно 200000 (Cantwell, Coles, Dimotakis, 1978).



Рис. 2. Турбулентное пятно Эммонса (получено с использованием суспензии алюминиевых хлопьев в воде)

Турбулентное пятно на ранней стадии своего развития показано в поперечном сечении, нормальном к потоку. При визуализации дым в аэродинамической трубе освещался лазерным световым ножом (рис. 3) (Perry, Lim, The, 1981) [8]. На рисунке видно, что с увеличением числа Рейнольдса контур пятна более четкий, а угол его фронтальной кромки уменьшается.

Что касается расчетов, связанных с оценкой параметров температурного поля в зазоре плоскопараллельного канала (рис. 4), а также теплообмена с учетом теплоты трения (течение Куэтта), то они выполнены проф. В. А. Кудиновым и асп. И. В. Кудиновым [9–11].

В [9] для решения указанной задачи применен ортогональный метод Л. В. Канторовича, с помощью которого получено решение в пятом приближении. При этом каких-либо принципиальных трудностей, связанных с дальнейшим увеличением числа приближений, не возникает. В то же время уже в пятом приближении найдено решение для значений безразмерной про-

дольной координаты  $\eta = 1 \cdot 10^{-4}$ , что позволило получить результаты, отсутствующие в известной литературе.

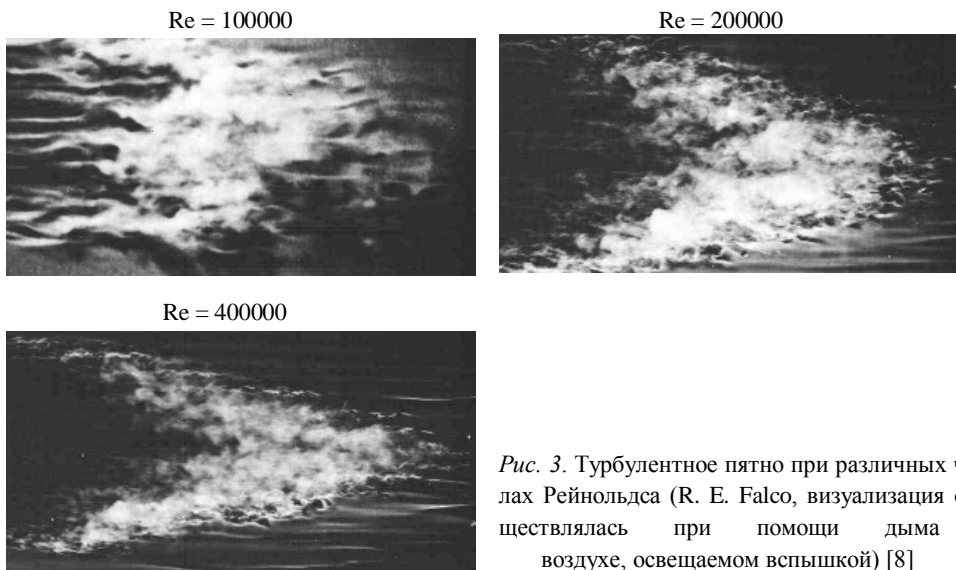


Рис. 3. Турбулентное пятно при различных числах Рейнольдса (R. E. Falco, визуализация осуществлялась при помощи дыма в воздухе, освещаемом вспышкой) [8]

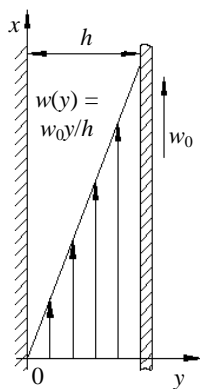


Рис. 4. Схема течения жидкости в плоскопараллельном канале

Математическая постановка задачи в данном случае имеет вид [9]:

$$w(y) \frac{\partial T(x, y)}{\partial x} = a \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} + \frac{\mu}{c\rho} \left( \frac{dw}{dy} \right)^2, \quad (1)$$

$$0 \leq y \leq h; \quad 0 \leq x < \infty;$$

$$T(0, y) = T_0; \quad T(x, 0) = T_1; \quad T(x, h) = T_2, \quad (2)$$

где  $w(y) = w_0 y/h$  – профиль скорости плоскопараллельного течения (течение Куэтта);  $h$  – ширина канала;  $y, x$  – поперечная и продольная координаты;  $\mu$  – динамическая вязкость;  $c$  – удельная теплоемкость;  $\rho$  – плотность;  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $T$  – температура;  $T_0$  – то же жидкости на входе в канал ( $x = 0$ );  $T_1, T_2$  – температуры стенок.

Введем следующие безразмерные переменные и параметры:

$$\xi = y/h; \quad \eta = x/(Pe h); \quad Pe = w_0 h/a, \quad (3)$$

где  $Pe$  – число Пекле.

С учетом принятых обозначений задачи (1), (2) приведем к виду:

$$\xi \frac{\partial T(\eta, \xi)}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 T(\eta, \xi)}{\partial \xi^2} + R_1; \quad (4)$$

$$0 \leq \eta < \infty; \quad 0 \leq \xi \leq 1;$$

$$T(0, \xi) = T_0; \quad (5)$$

$$T(\eta, 0) = T_1; \quad (6)$$

$$T(\eta, 1) = T_2, \quad (7)$$

где  $R_1 = \mu w_0^2 / \lambda$ ;  $\lambda = a c p$  – коэффициент теплопроводности.

Приближенное решение задачи в соответствии с ортогональным методом Л. В. Канторовича рассчитывается следующим образом [10, 11]:

$$T(\eta, \xi) = (T_1 - T_2)\xi + T_1 + \sum_{k=1}^n f_k(\eta)\varphi_k(\xi), \quad (8)$$

где  $f_k(\eta)$  – неизвестные функции;  $\varphi_k(\xi) = (1 - \xi)\xi^k$  – то же координатные.

Благодаря принятой системе координатных функций соотношение (8) точно удовлетворяет граничным условиям (6), (7).

Неизвестные функции  $f_k(\eta)$  ( $k = \overline{1, n}$ ) находим из решения дифференциального уравнения (4) при граничном условии (5) (рис. 5).

В случае  $n$  приближений необходимо составить невязку уравнения (4) и потребовать ортогональности невязки к  $n$  координатным функциям [9]

$$\int_0^1 \left[ \sum_{k=1}^n (\xi f_k' \varphi_k'' - f_k \varphi_k'') - R_1 \right] \varphi_j(\xi) d\xi = 0, \quad k = j = \overline{1, n}.$$

Для изучения теплоотдачи от отопительных приборов в условиях свободной конвекции и конвекции в вертикальной и горизонтальной щелях была изготовлена экспериментальная установка (рис. 6), схема которой иллюстрируется рис. 7.

Рис. 6. Общий вид экспериментальной установки

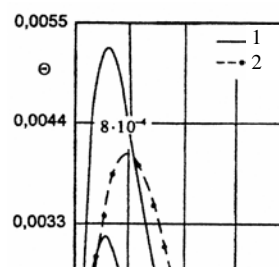


Рис. 5. Изменение температуры жидкости в плоском канале вследствие диссипации энергии: 1 – по (8) при  $n = 5$ ; 2 – по [12] (третье приближение)

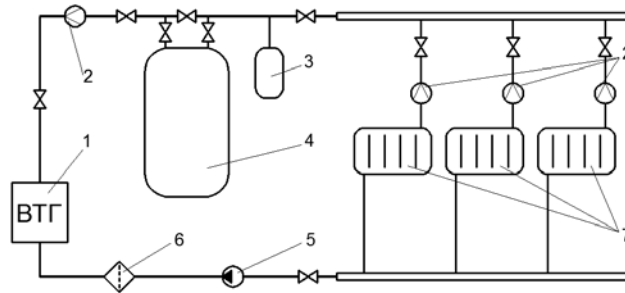


Рис. 7. Схема экспериментальной установки: 1 – вихревой теплогенератор ВТГ-2,2; 2 – расходомеры; 3 – расширительный бак; 4 – бак-накопитель; 5 – насос; 6 – фильтр; 7 – отопительные приборы

Эксперимент (трехфакторный анализ) выполнялся в соответствии со специально разработанным планом эксперимента, базирующимся на полиноме второго порядка [13]:

$$\begin{aligned}
 y = & A_0 + A_1x_1 + A_2x_2 + A_3x_3 + \dots + A_kx_k + A_{12}x_1x_2 + A_{13}x_1x_3 + \dots + \\
 & + A_{1k}x_1x_k + A_{23}x_2x_3 + \dots + A_{2k}x_2x_k + \dots + A_{3i}x_3x_i + \dots + \\
 & + A_{3k}x_3x_k + A_{ij}x_ix_j + \dots + A_{k-1,k}x_{k-1}x_k + A_{11}x_1^2 + A_{22}x_2^2 + \\
 & + A_{33}x_3^2 + \dots + A_{ii}x_i^2 + \dots + A_{kk}x_k^2;
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$y = A_0 + \sum_{\substack{i=1 \\ j=1 \\ i \neq j}}^k A_i x_i + \sum_{\substack{i=1 \\ j=1 \\ i \neq j}}^k A_{ij} x_i x_j + \sum_{\substack{i=1 \\ j=1 \\ i \neq j}}^k A_{ii} x_i^2. \tag{10}$$

Иными словами, выходная величина  $y$  имеет свободный член, соответствующий нулевому значению всех факторов, сумму линейных зависимостей  $\sum_{i=1}^k A_i x_i$ , где  $i$  – номер фактора;  $k$  – их общее количество, сумму линейных взаимодействий  $\sum_{\substack{i=1 \\ j=1 \\ i \neq j}}^k A_{ij} x_i x_j$  и сумму квадратичных членов  $\sum_{i=1}^k A_{ii} x_i^2$ .

В конкретном случае для плана эксперимента первого порядка (10) можно переписать (трехфакторный анализ) как  $2^k$ , где  $k$  – число факторов. Такой план позволяет получить линейную модель [14]

$$y = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i x_i, \tag{11}$$

где  $k$  – число факторов.

Общее число экспериментов  $N$  составит

$$N = 2^3 = 8.$$

Модель с взаимодействиями факторов несколько усложнится

$$y = A_0 + \sum A_i x_i + \sum_{\substack{i=1 \\ j=1 \\ i \neq j}}^k A_{ij} x_i x_j, \quad (12)$$

где  $A_0 = \frac{\sum_{n=1}^N y_n}{N}$ ;  $n$  – номер опыта;  $N$  – общее количество опытов;  $y_n$  – значение  $y$  в  $n$ -м опыте;

$$A_i = \sum_{n=1}^N y_n x_{in} / N; \quad A_{ij} = \sum_{n=1}^N y_n x_{in} x_{jn} / N; \quad i, j – \text{номера факторов.}$$

Для трехфакторного эксперимента имеем план (табл. 1).

Таблица 1

План трехфакторного эксперимента типа  $2^3$

№ опыта	Фактор						Выходная величина $y$
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	
1	+	+	+	+	+	+	$y_1$
2	–	+	+	–	–	+	$y_2$
3	–	–	+	+	–	–	$y_3$
4	+	–	+	–	+	–	$y_4$
5	+	+	–	+	–	–	$y_5$
6	–	+	–	–	+	–	$y_6$
7	–	–	–	+	+	+	$y_7$
8	+	–	–	–	–	+	$y_8$

Минимальное число повторностей эксперимента в каждой точке принимаем равным 3 [13]. Для исключения систематических неучтенных ошибок опыты рандомизировались [14]. Для этого очередность их проведения устанавливали при помощи таблиц случайных чисел [12]: 7 (1), 8 (1), 6 (1), 5 (1), 2 (1), 2 (2), 1 (1), 3 (1), 7 (2), 6 (2), 1 (2), 6 (3), 8 (2), 7 (3), 8 (3), 4 (1), 5 (2), 4 (2), 3 (2), 5 (3), 3 (3), 4 (3), 1 (3), 2 (3). В скобках указана повторяемость опыта.

Эксперимент выполняется только при установившемся тепловом режиме. Опыты проводили в десяти точках и были связаны с измерением температур теплоотдающей и тепловоспринимающей поверхностей, а также температуры в щели. Результаты обработки эксперимента представлены на рис. 8.

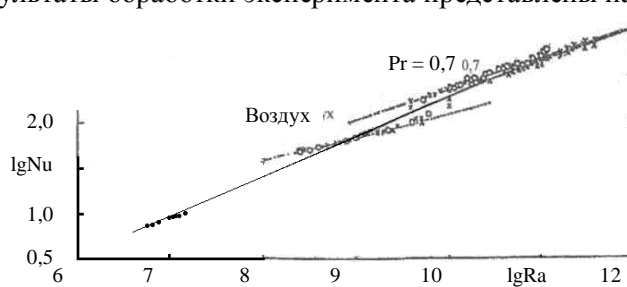


Рис. 8. Сравнение результатов эксперимента с уже имеющимися данными (точками) различных авторов для локальных чисел Нуссельта в переходном режиме свободной конвекции вдоль изотермических вертикальных пластин [15, 16]: • – результаты обработки эксперимента

## ВЫВОДЫ

1. Обосновывается возможность использования теплогенератора типа ВН в системах теплоснабжения передвижных медицинских учреждений.

2. Отмечена достаточная экономическая эффективность работы. Авторы считают, что вопрос, связанный с эффективностью диссипативного перехода первичной формы движения материи в теплоту, может быть полностью закрыт.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Халатов, А. А. Результаты испытаний вихревого теплогенератора ТПМ 5.5-1 / А. А. Халатов, А. С. Коваленко, С. В. Шевцов // Промышленная теплотехника. – 2002. – Т. 24, № 6. – С.40–46.
2. Потапов, Ю. С. Энергия вращения / Ю. С. Потапов, Л. П. Фоминский, С. Ю. Потапов. – Кишинев, 2001. – 382 с.
3. Самое дешевое отопление – с вихревым теплогенератором ТС1 // Системы теплообеспечения [Электронный ресурс]. – Одинцово-5, 2008. – Режим доступа: <http://www.teplosmos.ru> – Дата доступа: 18.12.2010.
4. Информационный ресурс о типах отопительных приборов [Электронный ресурс] / Автономные системы отопления. – М., 2011. – Режим доступа: <http://www.euro-aliance.ru> – Дата доступа: 20.09.2011.
5. Вихревые теплогенераторы // Отопительные системы нового поколения [Электронный ресурс]. – М., 2009. – Режим доступа: <http://www.otopiteli.nm.ru> – Дата доступа: 10.10.2011.
6. Шваб, В. А. Вихревой теплогенератор для систем теплоснабжения / В. В. Шваб // Новости теплоснабжения. – 2007. – № 8. – С. 12–13.
7. Козлов, С. В. Опыт внедрения автономных энергосберегающих систем отопления / С. В. Козлов // Новости теплоснабжения. – 2007. – № 8. – С. 14–16.
8. Ван-Дайк, М. Альбом течений жидкости и газа: А 56 / М. Ван-Дайк. – М.: Мир, 1986. – 184 с.
9. Кудинов, В. А. Теплообмен при течении Куэтта с учетом теплоты трения / В. А. Кудинов, И. В. Кудинов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2011. – № 2. – С. 43–51.
10. Кудинов, В. А. Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, В. В. Калашников. – М.: Высш. шк., 2005. – 430 с.
11. Кудинов, В. А. Теплопроводность и термоупругость в многослойных конструкциях / В. А. Кудинов, Б. В. Аверин, Е. В. Стефанюк. – М.: Высш. шк., 2005. – 305 с.
12. Цой, П. В. Методы расчета отдельных задач тепломассопереноса / П. В. Цой. – М.: Энергия, 1971. – 383 с.
13. Изаков, Ф. Я. Планирование эксперимента и обработка опытных данных / Ф. Я. Изаков. – Челябинск, 1997. – 128 с.
14. Зедгинидзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Г. Зедгинидзе. – М.: Наука, 1976. – 390 с.
15. Качар, И. Л. Исследование теплоотдачи отопительного прибора системы теплоснабжения полевого госпиталя, функционирующего в условиях чрезвычайных ситуаций / И. Л. Качар // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2011. – № 4. – С. 60–63.
16. Теплоснабжение полевого госпиталя, функционирующего в условиях чрезвычайных ситуаций / А. П. Несенчук // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2011. – № 3. – С. 91–93.

Представлена кафедрой ПТЭ и Т

Поступила 01.11.2011