

УДК 621.56

# К расчету геометрических параметров каналов насадки вращающегося регенеративного теплоутилизатора

Д-р техн. наук **В. А. ПРОНИН**, канд. техн. наук **В. В. ЛЕБЕДЕВ**

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО

Институт холода и биотехнологий

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

*In the article influence of several geometric parameters of regenerator checkerwork on its main characteristics is estimated, and also the range of practical application of geometric parameters is defined. The recommendations on constructive improvement of rotary heat exchanger are given.*

**Keywords:** rotary heat exchanger, regenerator checkerwork, heat efficiency, pressure loss.

**Ключевые слова:** вращающийся регенеративный теплоутилизатор, теплообменная насадка, тепловая эффективность, потери давления.

При проектировании вращающихся регенеративных теплоутилизаторов (ВРТ) необходимо иметь в виду, что изменение геометрических параметров насадки неоднозначно оказывается на таких показателях, как тепловая эффективность, потеря давления и площадь теплообменной поверхности (следовательно, и материалоемкость). Обеспечение более высокой тепловой эффективности, может приводить к высоким падениям давления в теплоутилизаторе и увеличению материалоемкости насадки.

В данной работе дается оценка влияния отдельных геометрических параметров насадки на ее основные характеристики; обозначается диапазон практического применения геометрических параметров, что в полной мере позволит конструкторам оценивать принимаемое решение еще на стадии проектирования, исходя из заданных условий и требований. Авторами даются рекомендации по конструктивному совершенствованию ВРТ.

В качестве объекта исследования выбран регенеративный теплоутилизатор ХРХР04 фирмы «Remak». Исследуемыми параметрами являются: глубина насадки —  $l$ , высота канала —  $h$  и режимные параметры (расход воздуха).

Оценка термической эффективности теплоутилизатора выполнена на основе *NTU*-методики расчета вращающегося регенеративного теплоутилизатора [1] с использованием экспериментальных данных [2]. Оценка потери давления в насадке проводилась на основе методики, представленной в работе [3]. Программа расчета вращающегося регенеративного теплоутилизатора на основе вышеописанных методик составлена в математическом пакете MathCad.

Исходные данные, принятые для расчета: температура приточного воздуха  $t_{11} = 5^{\circ}\text{C}$ ; температура удалаемого воздуха  $t_{21} = 22^{\circ}\text{C}$ ; расход потоков приточного воздуха в пределах  $V_1 = 1500 \dots 2700 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; расход удалаемого воздуха в пределах  $V_2 = 1500 \dots 2700 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; частота вращения насадки  $n = 13 \text{ об./мин.}$

Далее представлены результаты расчетов для исследуемого регенеративного теплоутилизатора

ХРХР04 при изменении глубины насадки в диапазоне  $l = 0,1 \dots 0,5 \text{ м}$ . Геометрические параметры профиля и диаметр теплообменной насадки соответствуют номинальным значениям ( $D = 0,770 \text{ м}$ ,  $h = 1,9 \text{ мм}$ ).

На рис. 1, 2 представлены зависимости термической эффективности и потерь давления от глубины насадки. Как видно, зависимости критериев от глубины насадки носят монотонный характер без экстремумов. Увеличение параметра  $l$  приводит к росту всех показателей.

Зависимость термической эффективности от глубины насадки показана на рис. 1. Рост термической эффективности (при увеличении  $l$ ) происходит только за счет увеличения площади теплообменной поверхности  $F$ , так как значения средних коэффициентов теплоотдачи остаются постоянными (скорость воздуха и эквивалентный диаметр канала не меняются). Наиболее интенсивный рост эффективности наблюдается в области малых глубин насадки ( $l = 0,1 \dots 0,25$ ) и далее темпы роста эффективности снижаются (что в основном приводит только к увеличению массы насадки и габаритов теплоутилизатора).

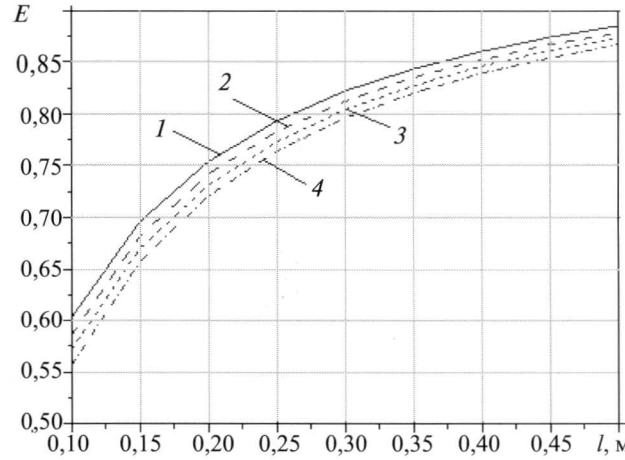


Рис. 1. Зависимость термической эффективности ВРТ ХРХР04 от глубины насадки:

1 — при  $V_1 = V_2 = 1500 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; 2 — при  $V_1 = V_2 = 1875 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;

3 — при  $V_1 = V_2 = 2250 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; 4 — при  $V_1 = V_2 = 2700 \text{ м}^3/\text{ч}$

Изменение расхода воздуха приводит к изменению термической эффективности, но оно неизначительно и составляет лишь несколько процентов. Таким образом, степень утилизации теплоты в ВРТ в большей степени определяется площадью теплообменной поверхности  $F(l)$  и в меньшей — расходом теплоносителей.

Зависимость потери давления воздуха  $\Delta P$  в насадке от глубины насадки  $l$  показана на рис. 2. Рост потери давления при увеличении  $l$  происходит вследствие увеличения потерь на трение в канале насадки, при этом потери давления на входе и выходе из насадки остаются неизменными, так как относительное «живое» сечение насадки не меняется. Отметим, что потеря давления существенно зависит от расходов воздушных потоков на всем диапазоне  $l$ .

Профиль регулярной насадки, образуемой гладкой и гофрированной фольгой, характеризуется высотой канала и толщиной фольги. Изменение высоты канала насадки вращающегося регенеративного теплоутилизатора приводит к изменению проходного сечения канала и вследствие этого живого сечения насадки, а так же площади теплообменной поверхности насадки.

Графики расчетов для исследуемого ВРТ XPXR04 при изменении высоты канала насадки в диапазоне  $h = 1 \dots 3$  мм показаны на рис. 3. Глубина и диаметр теплообменной насадки равны номинальным значениям ( $D = 0,770$  м,  $l = 0,200$  м).

Снижение термической эффективности регенератора при увеличении  $h$  объясняется увеличением проходного сечения канала насадки (скорость воздуха в канале меняется незначительно), уменьшением коэффициента теплоотдачи и уменьшением площади теплообменной поверхности насадки. Изменение расхода воздуха приводит к изменению термической эффективности, однако разность эффективностей незначительна и не превышает нескольких процентов (см. рис. 3).

Зависимости потери давления воздуха в насадке от  $h$  показаны на рис. 4. Снижение потери дав-

ления при увеличении  $h$  объясняется увеличением эквивалентного диаметра канала и, следовательно, снижением потери давления на трении в канале насадки.

Отметим значительную нелинейность функции  $\Delta P(h)$  на участке  $h = 1,0 \dots 1,6$  мм, на участке  $h = 1,6 \dots 3,0$  мм — нелинейность функции снижается. Это объясняется тем, что потеря давления на трение в канале обратно пропорциональна квадрату эквивалентного диаметра канала.

На графиках видно, что увеличение  $h$  ведет к снижению эффективности, а увеличение  $l$  — к росту эффективности. Используя представленные зависимости, можно определить термическую эффективность ВРТ XPXR04 при номинальном расходе воздуха ( $V_1 = V_2 = 1875 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) для широкого диапазона значений исследуемых геометрических параметров (рис. 5). Так требуемая эффективность теплоутилизатора может быть достигнута при различных сочетаниях  $l$  и  $h$ . Определить численные значения глубины и высоты канала насадки можно смещаясь по горизонтали из исходной точки.

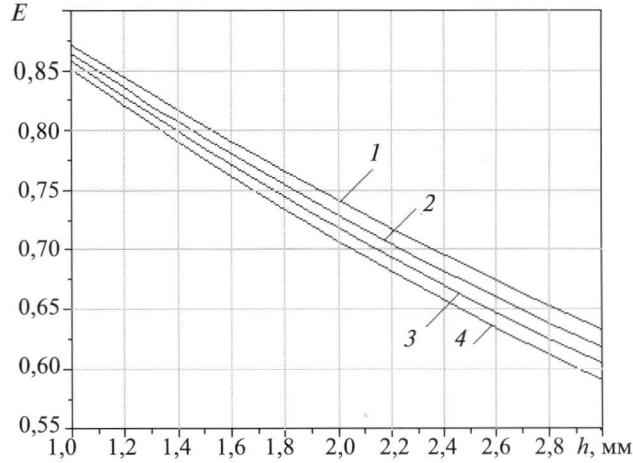


Рис. 3. Зависимость термической эффективности ВРТ XPXR04 от высоты канала:

1 — при  $V_1 = V_2 = 1500 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; 2 — при  $V_1 = V_2 = 1875 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  
3 — при  $V_1 = V_2 = 2250 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; 4 — при  $V_1 = V_2 = 2700 \text{ м}^3/\text{ч}$

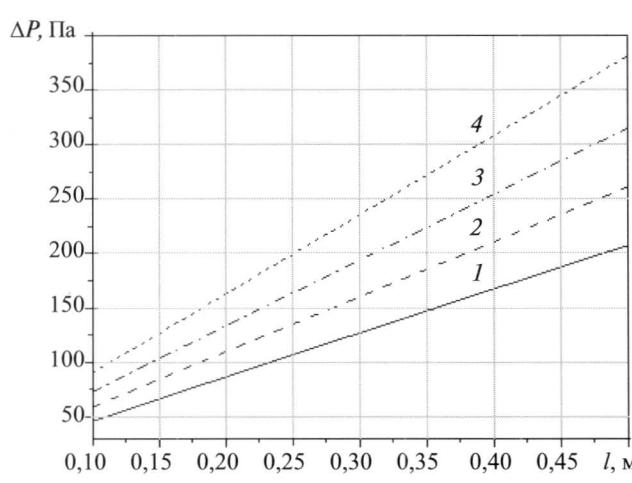


Рис. 2. Зависимость полной потери давления в ВРТ XPXR04 от глубины насадки:

1 — при  $V_1 = V_2 = 1500 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; 2 — при  $V_1 = V_2 = 1875 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  
3 — при  $V_1 = V_2 = 2250 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; 4 — при  $V_1 = V_2 = 2700 \text{ м}^3/\text{ч}$

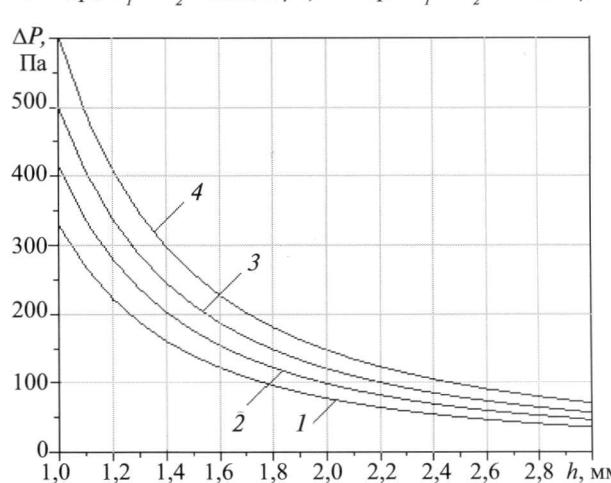


Рис. 4. Зависимость полной потери давления в ВРТ XPXR04 от высоты канала:

1 — при  $V_1 = V_2 = 1500 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; 2 — при  $V_1 = V_2 = 1875 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;  
3 — при  $V_1 = V_2 = 2250 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; 4 — при  $V_1 = V_2 = 2700 \text{ м}^3/\text{ч}$

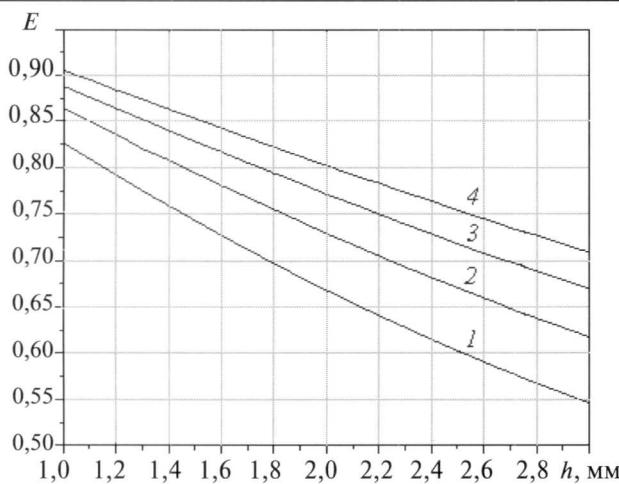


Рис. 5. Зависимость термической эффективности BPT XPXR04 от высоты канала при  $V_1 = V_2 = 1875 \text{ м}^3/\text{ч}$ :  
1 — при  $l = 0,15\text{м}$ ; 2 — при  $l = 0,20\text{м}$ ;  
3 — при  $l = 0,25\text{м}$ ; 4 — при  $l = 0,30\text{м}$

Так, к примеру, термическая эффективность  $E = 74,5\%$  может быть получена при  $h = 1,9\text{мм}$  и  $l = 0,20\text{м}$ , а так же и при  $h = 2,6\text{мм}$  и  $l = 0,30\text{м}$ . При этом произойдет увеличение площади теплообменной поверхности, габаритов корпуса, а так же снизится показатель компактности теплообменной поверхности (примерно на 33%). Увеличение глубины насадки приведет к увеличению перетока воздуха за счет вращения насадки.

На рис. 6 показаны зависимости потери давления в ВРТ от исследуемых геометрических параметров насадки. Анализ представленных зависимостей позволяет сделать вывод, что изменение высоты канала  $h$  в большей степени оказывает влияние на падение давления, чем изменение глубины насадки  $l$ . Таким образом, при совершенствовании конструкции ВРТ с целью снижения потери давления следует отдавать предпочтение увеличению высоты канала  $h$ . В области малых значений  $h < 1,6\text{мм}$  наблюдается значительная нелинейность функции  $\Delta P(h)$ ; в области высоких значений  $h > 2,4\text{мм}$  потери давления малы на всем диапазоне  $l$ .

Одна и та же поверхность теплообмена  $F$  может быть получена при различных сочетаниях параметров  $l$  и  $h$ , но интерес представляет зависимость термической эффективности и потери давления от площади теплообменной поверхности (рис. 7). Приращение площади  $F$  может быть достигнуто: при фиксированной высоте канала  $h$  — изменением глубины насадки; при фиксированной глубине насадки  $l$  — изменением высоты канала  $h$ .

Выполнен численный эксперимент для ВРТ XPXR04 при постоянных геометрических параметрах, соответствующих номинальным значениям, при расходе воздуха  $V_1 = V_2 = 1875 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Результаты расчетов показаны на рис. 7, 8. Как видно из рис. 7, термическая эффективность возрастает при увеличении  $F$ , при этом уменьшение высоты канала при  $h < 1,9\text{мм}$  приводит к более высоким значениям термической эффективности, чем увеличение глубины насадки, а при увеличении высоты канала при  $h > 1,9\text{мм}$  — к более низким значениям. Однако

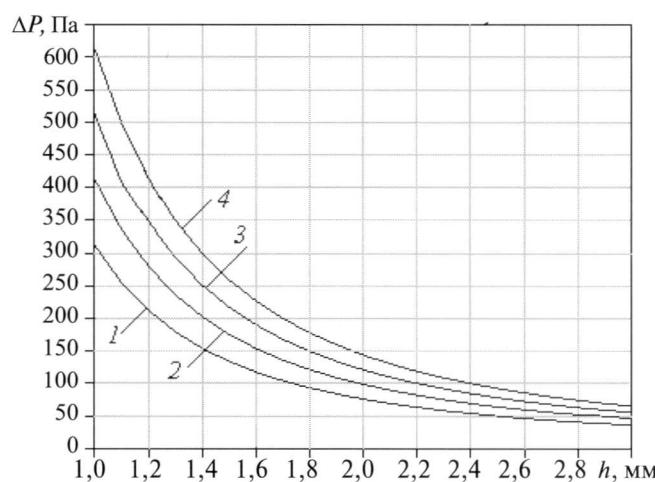


Рис. 6. Зависимость полной потери давления в ВРТ XPXR04 от высоты канала  $h$  при  $V_1 = V_2 = 1875 \text{ м}^3/\text{ч}$ :  
1 — при  $l = 0,15\text{м}$ ; 2 — при  $l = 0,20\text{м}$ ;  
3 — при  $l = 0,25\text{м}$ ; 4 — при  $l = 0,30\text{м}$

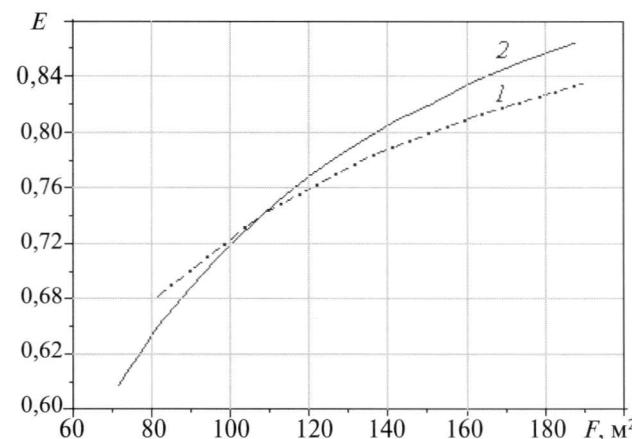


Рис. 7. Зависимость термической эффективности BPT XPXR04 от площади теплообменной поверхности  $F$  при различных  $l, h$ :  
1 — кривая переменной глубины насадки  $l$ ;  
2 — кривая переменной высоты канала  $h$

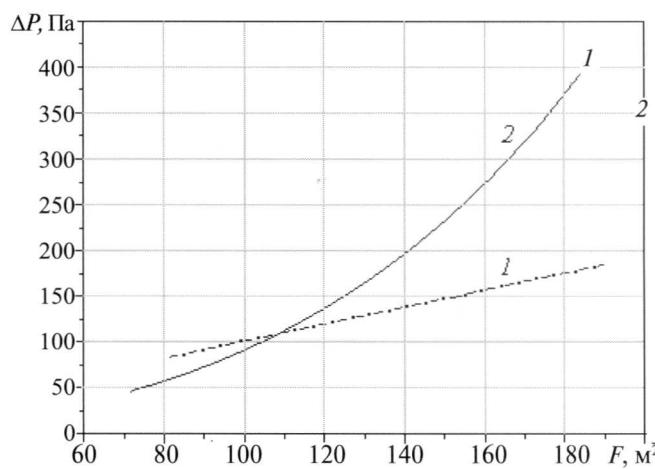


Рис. 8. Зависимость полной потери давления в ВРТ XPXR04 от площади теплообменной поверхности  $F$  при различных  $l, h$ :  
1 — кривая переменной глубины насадки  $l$ ;  
2 — кривая переменной высоты канала  $h$

разность эффективностей для двух рассмотренных случаев незначительна и не превышает нескольких процентов. Следует так же отметить, что значение требуемой величины эффективности достигается при меньшем значении площади теплообмена  $F(h)$  (при  $h < 1,9$  мм), чем при значении  $F(l)$ , и, наоборот, при  $h > 1,9$  мм — при большем значении  $F(h)$ .

Из графиков, показанных на рис. 8, становится очевидно, что увеличение  $F(h)$  приводит к значительному увеличению потери давления вследствие существенного уменьшения проходного сечения канала насадки при неизменной глубине насадки, это в свою очередь приводит к увеличению потери давления воздуха на трении в каналах насадки и незначительному увеличению потери давления на входе и выходе из насадки. Изменение  $F(l)$  оказывает не столь сильное влияние на величину потери давления (кривая 2, рис. 8), что связано с увеличением потери давления на трении за счет увеличения глубины насадки  $l$ .

На основании проведенного анализа зависимостей, можно утверждать, что качественный характер полученных зависимостей является общим для всех регенераторов с исследуемым типом профиля насадки.

## Выводы

- Степень утилизации теплоты в ВРТ в большей степени определяется площадью теплообменной поверхности насадки теплоутилизатора ( $F(l)$ ,  $F(h)$ ,  $F(h, l)$ ) и в меньшей — расходом теплоносителей.

- Изменение расхода воздуха слабо сказывается на изменении термической эффективности и влияет в основном на сопротивление теплоутилизатора.

- Высоту канала  $h$  можно считать основным параметром при конструктивном совершенствовании ВРТ, как с целью повышения термической эффективности, так и с целью снижения потери давления. При проектировании и изготовлении ВРТ с данным профилем насадки можно рекомендовать диапазон значений  $h$  в пределах 1,6...3,0 мм, что позволит достичь высоких значений эффективности при допустимом уровне потерь давления.

- Увеличение глубины насадки  $l$  при больших значениях  $h = 2,5...3,0$  мм повышает эффективность утилизации теплоты при невысокой потере давления, что позволит использовать данные ВРТ в условиях, к примеру, высокой запыленности и загрязненности воздушных потоков.

- Рекомендуется проектировать ВРТ с глубиной насадки в диапазоне: при средней высоте канала ( $h = 1,8...2,4$  мм) —  $l = 0,2...0,25$  м; при большой высоте канала ( $h = 2,5...3,0$  мм) —  $l = 0,25...0,3$  м.

## Список литературы

- Кэйс В. М., Лондон А. Л. Компактные теплообменники.* — М.: Энергия, 1967.
- Лебедев В. В. Повышение эффективности роторных утилизаторов теплоты в системах кондиционирования воздуха.* // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — СПб.: СПбГУНПТ, 2009.
- Лебедев В. В., Пронин В. А. Инженерная методика расчета потерь давления в рабочей части врачающегося регенеративного теплоутилизатора* // Вестник MAX. 2009. № 3.