

Ю.Ф. ДЬЯЧУК, аспирант (КГЭУ)  
Научный руководитель А.И. ХАЙБУЛЛИНА, к.т.н., доцент (КГЭУ)  
г. Казань

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА С НИЗКОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ НА ТЕПЛООБМЕН В КАНАЛЕ ПЛАСТИНЧАТОГО РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА**

В условиях растущего дефицита энергетических ресурсов и усиления экологических требований к промышленным системам вопрос энергосбережения приобретает первостепенное значение. Одним из наиболее эффективных способов снижения энергопотребления является утилизация вторичных энергетических ресурсов, в частности – тепла уходящих газов, сточных вод или технологических сред. В данном аспекте рекуперативные теплообменники играют ключевую роль, обеспечивая передачу тепловой энергии от горячего теплоносителя к холодному без их смешения, что позволяет значительно сократить затраты на нагрев или охлаждение рабочих сред [1].

Рекуперативные теплообменники находят широкое применение в системах вентиляции и кондиционирования, энергетике, химической, нефтегазовой и пищевой промышленности, а также в жилищно-коммунальном хозяйстве. Их эффективность напрямую влияет на общий энергетический баланс технологического процесса или здания. Поэтому повышение энергоэффективности таких аппаратов – важная научно-техническая задача, решение которой способствует не только экономии топливно-энергетических ресурсов, но и снижению выбросов парниковых газов [2].

Одним из перспективных направлений в этой области является применение пористых материалов с низкой теплопроводностью в конструкциях рекуперативных теплообменников. Пластинчатые рекуперативные теплообменные аппараты широко используются благодаря компактности, высокой эффективности теплопередачи и относительной простоте обслуживания. Однако их дальнейшее усовершенствование требует поиска новых решений, способных оптимизировать распределение температурных полей и минимизировать тепловые потери [3].

Использование пористых материалов с низкой теплопроводностью в межканальном пространстве или в качестве элементов конструкции теплообменника может существенно повлиять на характер течения рабочей среды и интенсивность теплообмена. С одной стороны, такие ма-

териалы способны снижать тепловые потоки между соседними каналами, улучшая изоляционные свойства аппарата. С другой – их структура может изменять гидродинамические условия, что, в свою очередь, влияет на коэффициенты теплоотдачи и общую эффективность теплообмена.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью количественной и качественной оценки влияния пористых низкотеплопроводных материалов на теплогидравлические характеристики канала пластинчатого рекуперативного теплообменного аппарата.

Научная новизна исследования заключается в анализе влияния пористого материала с низкой теплопроводностью на теплогидравлические характеристики канала пластинчатого рекуперативного теплообменника. В отличие от традиционных подходов, ориентированных преимущественно на интенсификацию теплообмена за счёт увеличения поверхности или турбулизации потока, в работе предложен и альтернативный механизм управления теплопередачей – через локальное снижение теплопроводности межканальных зон с использованием пористых структур.

Практическая значимость проведённого исследования заключается в возможности использования полученных результатов для разработки и модернизации энергоэффективных пластинчатых рекуперативных теплообменных аппаратов. Полученные результаты позволят снизить тепловые потери между соседними потоками, что особенно актуально в системах с малыми температурными напорами, например, в вентиляции, кондиционировании и низкотемпературной утилизации тепла.

В работе [4] описан высокоэффективный рекуперативный теплообменник, эффективность которого может превышать 98%. Данный теплообменник состоит из отдельных блоков углеродной пены. Пористый материал уложен между тонкими листами нержавеющей стали с низкой теплопроводностью. Углеродная пористая вставка используется для улучшения теплопередачи между горячими и холодными жидкостями, что позволяет уменьшить размер теплообменника. Каналы подачи расположены поочередно модульным образом, так что горячий и холодный потоки в теплообменнике протекают противотоком. Авторами исследования разработана новая конфигурация для минимизации осевой проводимости. Результаты эксперимента показали, что теплообменник на основе углеродной пены может эффективно передавать тепло от горячего потока к холодному. При использовании четырех пар блоков из углеродной пены достигнута общая эффективность более 80%. Общая эффективность более 0,98 может быть достигнута при использовании 50 пар блоков из углеродной пены. Эта разработка имеет преимущества в размере и весе и может быть расширена для более крупных систем.

Также в эксперименте [5] используется твердый и гофрированный углеродный пористый материал различных размеров. Исследование показывает, что углеродная пена может усиливать теплопередачу, а коэффициент теплопередачи увеличивается с уменьшением длины пены. Гофрирование может уменьшить перепад давления при сохранении высокого коэффициента теплопередачи. Эффективность для одной пары пористого материала из углеродного волокна ограничена из-за эффекта осевой проводимости пены. Анизотропное свойство пенополиуретана может быть использовано для получения более высокой эффективности для одной пары пеноблоков. Высокая эффективность теплообменника может быть достигнута путем размещения больших пар блоков из углеродного пористого материала последовательно. Эксперименты с четырьмя парами блоков из углеродного волокна показали, что можно достичь общей эффективности более 80%. Гофрирование может повысить общий коэффициент теплопередачи и одновременно снизить перепад давления в рекуперативных теплообменниках. Гофрирование не оказывает существенного влияния на эффективность, хотя перепад давления значительно снижается. Основываясь на этих данных испытаний, прогнозируется, что общая эффективность теплообменника в 98% может быть достигнута при использовании 50 пар блоков из углеродного пористого материала.

Расчет производится на примере модели пластинчатого рекуператора RVP-RPX с количеством пластин  $N_{пл}=9$  штук, количеством каналов (промежутки между пластинами)  $N_k=10$  штук. Поверхность теплообмена пластинчатых рекуператоров представляет собой наборку специально спрофилированных алюминиевых пластин толщиной  $s=0,0002$  м. В качестве пористых вставок использовался материал из пенополиуретана и меламин. Данные пористых материалов для расчета представлены в работе [6,7].

Теплоотдача рассчитывается по формуле (1):

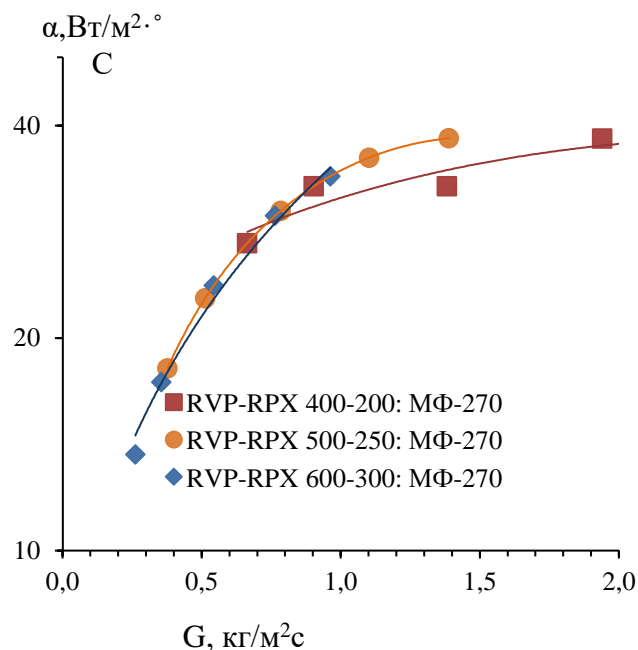
$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{h} \quad (1)$$

Массовый расход воздушного потока вычисляется по формуле (2):

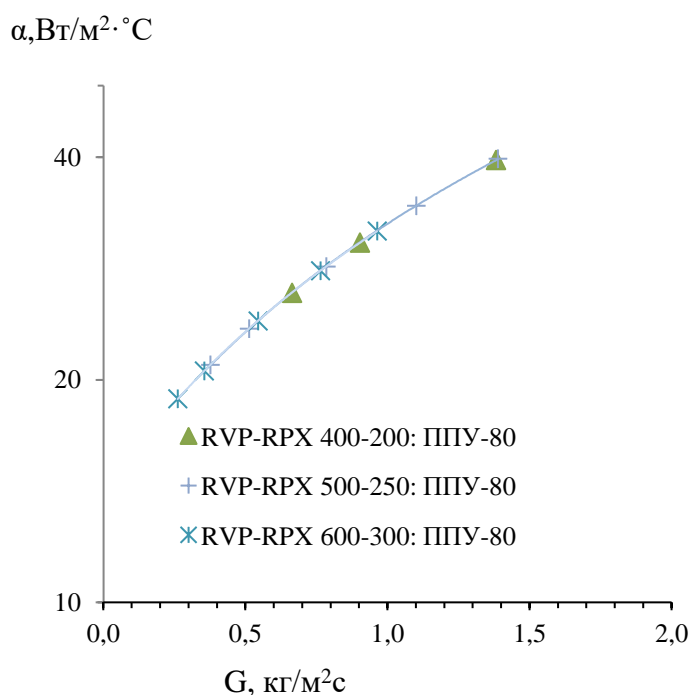
$$G = \frac{F_V \cdot \rho_{inlet}}{S \cdot 3600} \quad (2)$$

На рисунке 1 сравнивается коэффициент теплопередачи для разных пористых материалов и моделей рекуператора. Заметно, что для рекуператора RVP-RPX 400-200 значения расположены выше остальных, что объ-

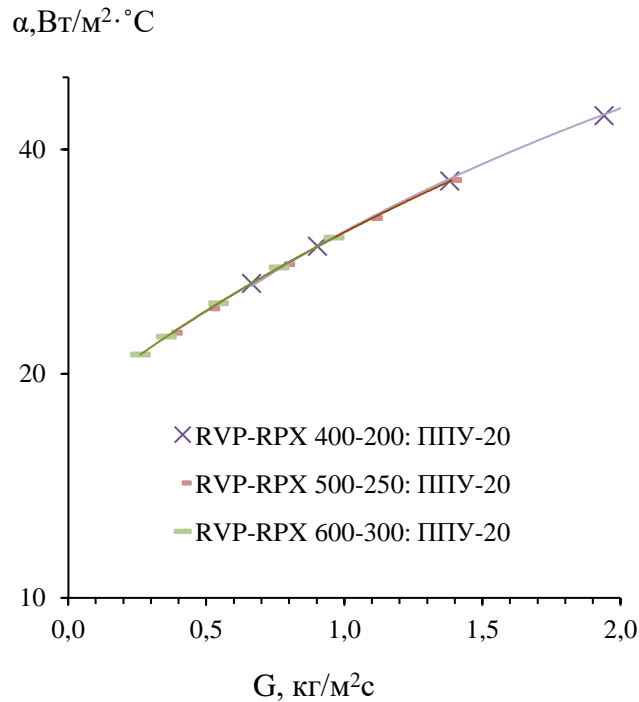
ясняется большей поверхностью теплообмена. Наименьшие значения коэффициента теплоотдачи характерны для пенополиуретана ППУ-20, что обусловлено его низкой плотностью и слабой теплопроводностью, ограничивающей передачу тепла от стенки к потоку. Несмотря на это, такой материал может быть предпочтителен в случаях, когда приоритетом является минимизация тепловых потерь между каналами.



а



б



В

Рис. 1. График зависимости коэффициента теплоотдачи от расхода воздушного потока при разных моделях рекуператора: *а* – материал из меламина ППУ-270; *б* – материал из пенополиуретана ППУ-80; *в* – материал из пенополиуретана ППУ-20

В ходе выполненного исследования было установлено, что применение пористых материалов с низкой теплопроводностью в канале пластинчатого рекуперативного теплообменного аппарата оказывает существенное влияние как на интенсивность теплообмена, так и на распределение температурных полей в рабочей зоне. Показано, что такие материалы позволяют эффективно снижать паразитные тепловые потоки между соседними каналами, что особенно важно при малых температурных напорах и в компактных теплообменных модулях.

#### Список литературы:

1. Slater, A.G., Cooper A.I. Function-led design of new porous materials // Science, 2015. – Vol. 348, № 6238. – P. aaa8075.
2. Liu, D., Zhao, F.-Y., Tang, G.-F. Active low-grade energy recovery potential for building energy conservation // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010. – Vol. 14, № 9. – P. 2736–2747.
3. Fehrm, M., Reiners, W., Ungemach, M. Exhaust air heat recovery in buildings // International Journal of Refrigeration, 2002. Vol. 25, № 4. P. 439–449.

4. Koç A. et al. Performance analysis of a novel organic fluid filled regenerative heat exchanger used heat recovery ventilation (OHeX-HRV) system // Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2020. – Vol. 41. – P. 100787.

5. Lin, Y.R. et al. Experimental Study on Heat Transfer and Pressure Drop of Recuperative Heat Exchangers Using Carbon Foam // Journal of Heat Transfer, 2010. – Vol. 132, № 9. – P. 091902.

6. Сабирова, Ю.Ф. Теплообмен и гидродинамика в пористой среде с низкой теплопроводностью: Выпускная квалификационная работа. Казань, 2023.

7. Hayrullin, A. et al. Experimental investigation of the heat transport and pressure drop in open-cell polyurethane foams // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023. – Vol. 217. – P. 124709.

Информация об авторах:

Дьячук Юлия Фанисовна, аспирант гр.СЭМа-1-25, КГЭУ, 420066, г. Казань, ул. Красносельская д. 51, к. Д, julia.sabirova01@list.ru

Хайбуллина Айгуль Ильгизаровна, к.т.н., доцент, КГЭУ, 420066, г. Казань, ул. Красносельская д. 51, к. Д, haybullina.87@mail.ru