



УДК 536.24

Е. С. ЛАПИН¹, канд. техн. наук, доц. кафедры теплоэнергетических систем;
А. П. ЛЕВЦЕВ¹, д-р техн. наук, проф. кафедры теплоэнергетических систем;
Е. С. СЕРГУШИНА¹, зам. директора по учебной работе многопрофильного колледжа;
С. А. ПАНФИЛОВ¹, д-р техн. наук, проф. кафедры электроники и электротехники;
О. В. КАБАНОВ¹, канд. техн. наук, доц. кафедры электроники и электротехники;
А. Ю. КАШУРКИН, заведующий лабораторией², ст. преп.³; **С. М. УСИКОВ**, науч. сотрудник², к.т.н., доц.³

ВЛИЯНИЕ КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ ПОТОКА НА ТЕПЛООБМЕН

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва» (НИ МГУ им Н. П. Огарева).

Россия, 430005, Республика Мордовия, Саранск, Большевикская улица, д. 68/1.

Тел.: (8342) 24-37-32; эл. почта: mrsu@mrsu.ru

²ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН).

Россия, 127238, г. Москва, Локомотивный пр., д. 21.

Тел.: (495) 482-40-76; эл. почта: leontiii@mail.ru; usikov-work@yandex.ru

³ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ).

Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Эл. почта: leontiii@mail.ru; usikov-work@yandex.ru

Ключевые слова: теплообмен, пульсирующее течение, коэффициент теплопередачи, колебательный режим, кожухотрубный теплообменник, число Нуссельта, аналогия Рейнольдса, импульсные технологии, гидродинамика.

В представленной работе исследуется влияние пульсирующего течения жидкости на эффективность теплопередачи в различных типах теплообменных аппаратов. На основе анализа монографии Б. М. Галицейского и экспериментальных данных Р. Кейла установлено, что переход от стационарного к колебательному режиму течения способствует увеличению коэффициента теплоотдачи. Проведены экспериментальные исследования на кожухотрубных и пластинчатых теплообменниках, а также в системе «труба в трубе». Результаты показывают, что при определенных частотах колебаний (0,1–2 Гц) и амплитудах скорости коэффициент теплопередачи возрастает до 1,8 раза. Максимальный прирост эффективности (до 30 %) наблюдается в пластинчатых теплообменниках, однако отмечается значительный разброс данных в импульсном режиме. Рассмотрены перспективные схемы применения импульсных технологий в системах теплоснабжения. Выявлены ограничения, связанные с гидравлическими потерями и сложностью конструкции, что требует дальнейшего совершенствования оборудования [1, 2].

Актуальность исследований в области интенсификации процессов теплопередачи обусловлена постоянно растущими требованиями к энергоэффективности промышленного оборудования и систем жизнеобеспечения [3]. Одним из перспективных направлений является использование управляемых гидродинамических возмущений, в частности, пульсирующего течения теплоносителя. Несмотря на то, что явление влияния пульсаций на теплообмен известно уже несколько десятилетий, его широкое



практическое применение сдерживается отсутствием универсальных инженерных методик расчета и прогнозирования эффекта [4]. Современные вычислительные методы, такие как *CFD*-моделирование, позволяют глубже изучить физику процесса и оптимизировать параметры пульсаций для конкретных типов теплообменных аппаратов [5]. Целью данной работы является систематизация теоретических и экспериментальных данных по влиянию колебательного потока на теплообмен и оценка перспектив применения импульсных технологий в теплоэнергетике.

В монографии Б. М. Галицейского представлен детальный сравнительный анализ теплопередачи при стационарном и пульсирующем течении жидкостей. Результаты исследования демонстрируют, что переход к колебательному режиму в значительной степени способствует росту относительного коэффициента теплоотдачи. Это явление обусловлено формированием поперечных течений и вихревых структур в потоке теплоносителя, при этом ключевую роль играет толщина колеблющегося пограничного слоя:

$$\delta_K = \left(\frac{2\nu}{\omega} \right)^{0,5}, \quad (1)$$

где δ – толщина колеблющегося пограничного слоя, м;

ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

ω – круговая частота колебаний, рад/с.

Колебательное течение с образованием стоячих волн представляет значительный интерес для изучения процессов теплопередачи. В таких условиях наблюдается выраженная пространственная неравномерность распределения интенсивности теплообмена по длине канала [6]. Анализ экспериментальных данных проводимых исследований показывает, что пиковые значения коэффициента теплопередачи соответствуют зонам максимальных колебаний (пучностям), в то время как минимальные показатели фиксируются в узловых точках – это полностью соответствует теоретическим представлениям о динамике стоячих волн [7].

Для количественной оценки процесса теплопередачи используется следующее критериальное уравнение относительного коэффициента:

$$K = \frac{Nu}{Nu_0} = f \left(\frac{\delta_K}{\delta_0}, Re, M, \frac{T_w}{T_f}, \frac{\Delta u_0}{u_0} \right), \quad (2)$$

где Nu – число Нуссельта при наличии колебаний;

Nu_0 – число Нуссельта при стационарном течении;

δ_0 – толщина стационарного слоя, м;

Re – критерий Рейнольдса;

M – число Маха;

T_w – период колебаний для поверхности теплообмена, с;

T_f – средний период колебаний потока, с;

$\frac{\Delta u_0}{u_0}$ – относительная амплитуда колебаний скорости.

Современные исследования показывают, что механизм интенсификации теплообмена при пульсациях существенно зависит от режима течения [8]. В ламинарном потоке пульсации вызывают устойчивую конвекцию, способствующую выравниванию температуры и уменьшению термического

сопротивления. В турбулентном режиме основную роль играет взаимодействие пульсаций с турбулентной структурой потока, что может как усиливать, так и ослаблять турбулентность в пристенной области в зависимости от частоты и амплитуды.

Экспериментальные исследования, проведенные Б. М. Галицейским и Р. Кейлом, содержат ценные данные о воздействии низкочастотных вибраций на интенсивность теплообмена. В качестве объекта исследования использовался кожухотрубный теплообменник со следующими техническими характеристиками:

- длина трубного пучка – 940 мм;
- количество теплообменных труб – 36;
- внутренний диаметр труб – 13,5 мм.

Испытания выполнялись при температуре воды 17°C с применением пара в качестве нагревающей среды. Число Рейнольдса варьировалось от $2,9 \cdot 10^3$ до $17,5 \cdot 10^3$, частота колебаний – от 0,4 до 1,1 Гц.

Проведенные измерения выявили закономерность: относительный коэффициент теплопередачи K демонстрирует устойчивый рост при увеличении амплитуды колебаний скорости в диапазоне от 1 до 4 для всех исследуемых режимов течения (ламинарного, переходного и развитого турбулентного). Наиболее существенное влияние температурных параметров греющего пара отмечается в ламинарном режиме, где наблюдается максимальный прирост эффективности теплообмена [9].

В проводимых нами исследованиях также исследован теплообменник типа «труба в трубе» (внутренний диаметр 51 мм, длина 0,60 м) с пульсирующим потоком воды, создаваемым поршневым насосом. Максимальный нагрев воды составлял T °C, частота колебаний – f Гц. При амплитуде колебаний $A = \frac{\Delta u_0}{u_0}$ и числе Рейнольдса Re зафиксировано увеличение коэффициента теплоотдачи до K % (рис. 1). Полученные данные хорошо согласуются с результатами других авторов, которые также отмечают наличие оптимальной частоты пульсаций, при которой эффект интенсификации максимален [10].

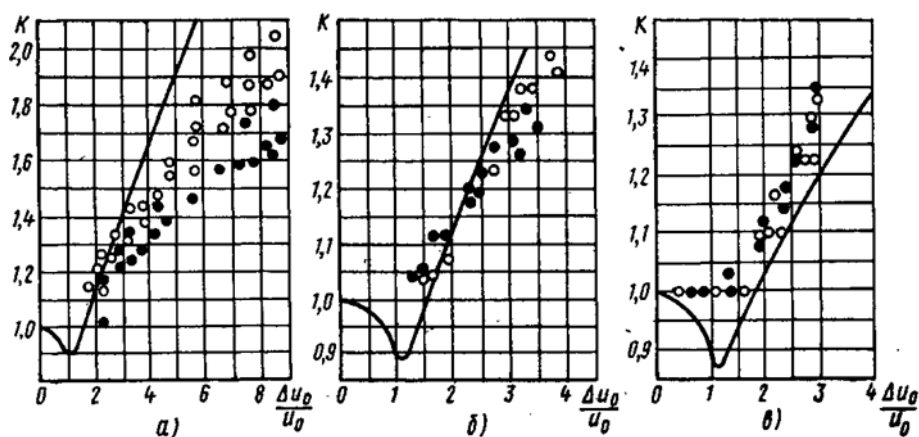


Рис. 1. Зависимость относительного коэффициента теплоотдачи от амплитуды колебаний скорости при различных частотах: а) ω_1, f_1 Гц; б) ω_2, f_2 Гц; в) ω_3, f_3 Гц;
● – давление пара 1,62 кгс/см²; ○ – давление пара 1,125 кгс/см²



Для моделирования процессов в кожухотрубных теплообменниках применена аналогия Рейнольдса, предполагающая постоянство скорости и температуры в поперечном сечении потока. Тепловой поток рассчитывался по формуле:

$$\dot{m} = \frac{\sum m_i}{Ft}, \quad (3)$$

где m – плотность потока массы, кг;

F – площадь поверхности теплообмена, м²;

t – расчетный период времени, с.

Число Стентона, выражающее аналогию Рейнольдса:

$$St = \frac{C_f}{2}, \quad (4)$$

где C_f – коэффициент трения.

Коэффициент теплоотдачи определяется как:

$$St = \frac{\alpha}{c_r \rho \omega_\infty}. \quad (5)$$

При этом коэффициент трения рассчитывается по формуле:

$$\tau_\infty = C_f \frac{\rho \omega_\infty^2}{2}. \quad (6)$$

Экспериментальные данные показывают увеличение коэффициента теплоотдачи до 1,8 раза при частоте 0,1–2 Гц. Максимальный экспериментальный прирост составил 14 % при $\omega=10$ рад/с (рис. 2).

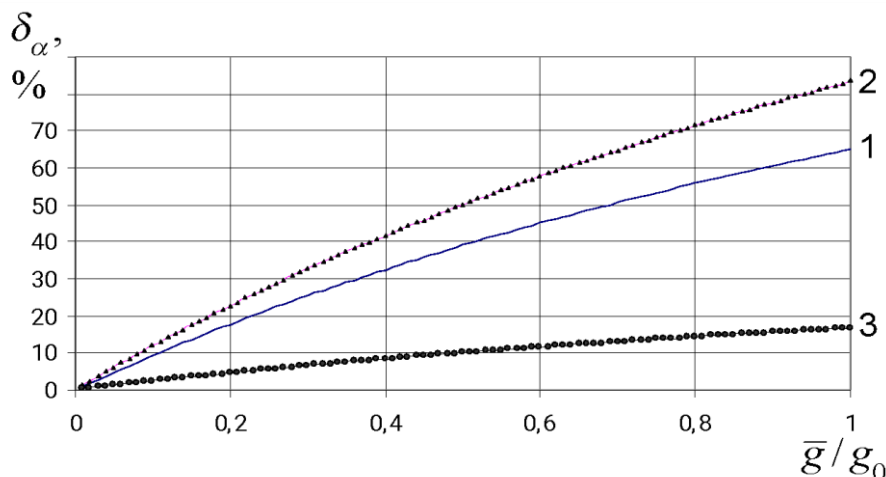


Рис. 2. Зависимость приращения коэффициента теплоотдачи от амплитуды колебаний: 1 – 10 рад/с (эксперимент); 2 – 12 рад/с; 3 – 4 рад/с

Исследования демонстрируют возможность повышения коэффициента теплопередачи на 20 % в кожухотрубных теплообменниках ГВС при использовании специального ударного клапана [11]. Однако значительные гидравлические потери ограничивают применение таких систем случаями с избыточным располагаемым напором. Следует отметить, что гидравлическое сопротивление при пульсирующем течении может в 1,5–2 раза превышать

сопротивление при стационарном режиме с тем же средним расходом, что является существенным недостатком технологии [12].

В пластинчатых теплообменниках достигнуто увеличение коэффициента теплопередачи до 30 %, хотя отмечался значительный разброс данных в импульсном режиме [13]. Эффективность системы снижается при уменьшении расхода нагреваемого теплоносителя. Высокая эффективность в пластинчатых аппаратах объясняется сложной геометрией каналов, которая способствует генерации вторичных течений и более интенсивному разрушению пограничного слоя под действием пульсаций.

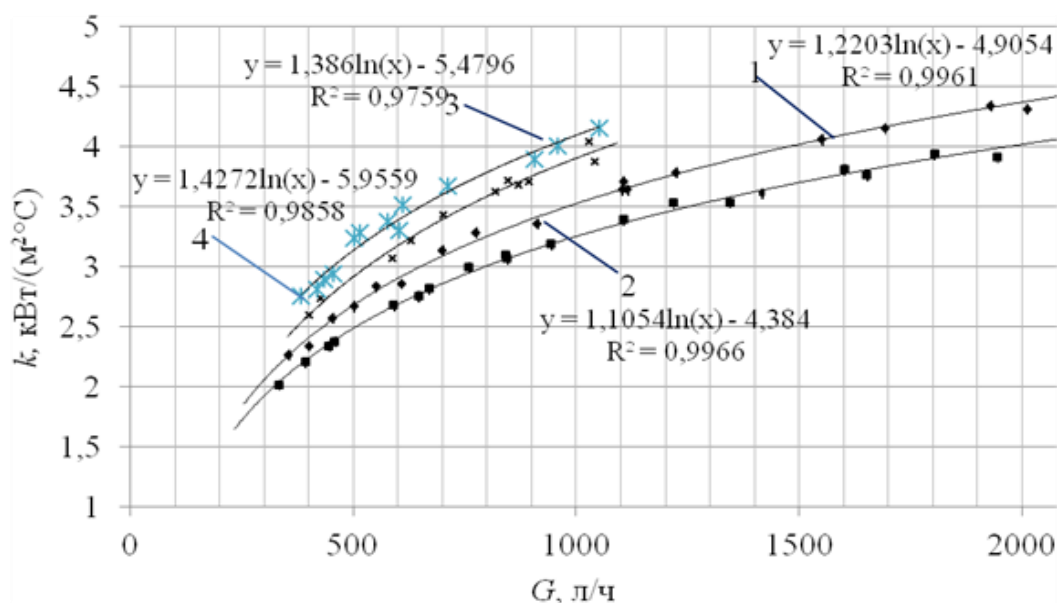


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопередачи от расхода греющего теплоносителя:
1, 2 – стационарный режим (70 °C и 50 °C соответственно);
3, 4 – импульсный режим (70 °C и 50 °C соответственно)

Проведенный мета-анализ данных из различных источников позволяет сделать вывод о том, что эффективность импульсной технологии сильно зависит от геометрии канала. Наибольший относительный выигрыш наблюдается в каналах с малыми гидравлическими диаметрами и в условиях, близких к ламинарному режиму течения.

Анализ схем ИТП выявил их недостатки, связанные с изменением расхода греющей среды. Перспективные схемы для зависимых систем представлены на рис. 4 и 5, однако их широкое применение ограничивается сложностью конструкции и низкой надежностью импульсных устройств.

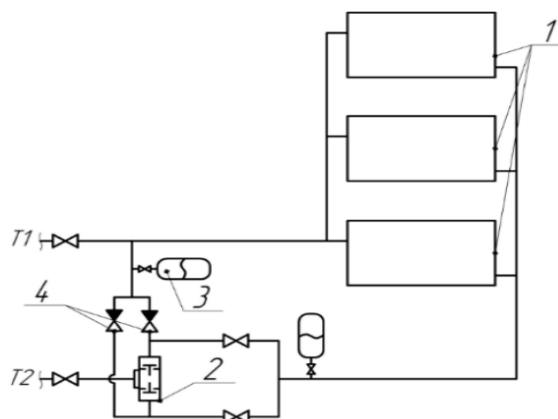


Рис. 4. Схема абонентского ввода с импульсным устройством:

1 – радиаторы; 2 – импульсное устройство; 3 – мембранный бак; 4 – обратный клапан; T1, T2 – трубопроводы.

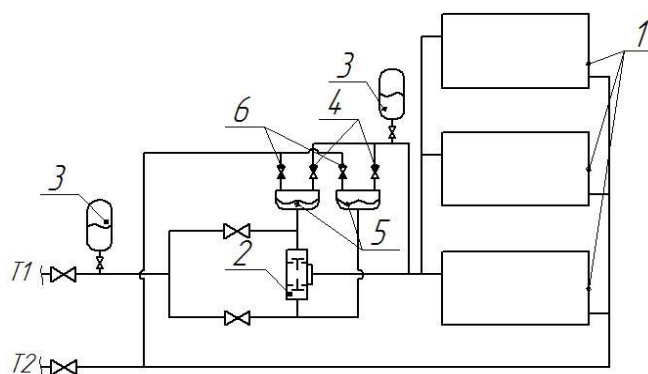


Рис. 5. Схема с импульсным устройством и мембранными насосами:

1 – радиаторы; 2 – импульсное устройство; 3 – бак; 4, 6 – клапаны; 5 – насос; T1, T2 – трубопроводы

К основным техническим проблемам, препятствующим массовому внедрению импульсных технологий, можно отнести: повышенный шум и вибрации, необходимость обеспечения надежности и долговечности импульсных генераторов (клапанов, мембранных насосов), сложность синхронизации работы нескольких устройств в одной системе. Кроме того, энергозатраты на создание пульсаций могут нивелировать выгоду от интенсификации теплообмена, поэтому важной задачей является поиск энергоэффективных способов создания гидравлических возмущений.

Дальнейшее развитие импульсных технологий требует совершенствования конструкций клапанов и расширения области их применения, включая системы индивидуального отопления.

Проведенный анализ подтверждает высокую эффективность использования пульсирующего потока для интенсификации теплообмена в различных типах теплообменных аппаратов. Установлено, что коэффициент теплопередачи может быть увеличен до 1,8 раза в кожухотрубных теплообменниках и до 30 % в пластинчатых при оптимальных частотах (0,1–2 Гц) и амплитудах колебаний. Однако широкое практическое применение импульсных технологий сдерживается



рядом факторов, главными из которых являются значительное увеличение гидравлического сопротивления, сложность и низкая надежность оборудования для создания пульсаций, а также недостаточная изученность влияния пульсаций на долговечность теплообменных аппаратов.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются: разработка энергоэффективных импульсных устройств с адаптивным управлением параметрами пульсаций; проведение комплексных исследований влияния пульсаций на процессы теплообмена в двухфазных потоках; создание универсальных инженерных методик расчета теплообменников, работающих в импульсном режиме.

Дальнейшее развитие импульсных технологий требует совершенствования конструкций клапанов и расширения области их применения, включая системы индивидуального отопления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент № 2716545 С1 Российская Федерация, МПК F24D 3/00, F24D 17/00. Система теплоснабжения и способ организации ее работы : № 2019131243 : заявл. 03.10.2019 : опубл. 12.03.2020 / А. П. Левцев, Е. С. Лапин, А. А. Голянин [и др.] ; заявитель Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва.
2. Патент № 2754569 С1 Российская Федерация, МПК F24D 3/02. Система отопления здания независимого присоединения с организацией в ней пульсирующего режима движения теплоносителя : № 2020134571 : заявл. 21.10.2020 : опубл. 03.09.2021 / А. П. Левцев, А. А. Голянин, Е. С. Лапин ; заявитель Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва.
3. Патент № 2746638 С1 Российская Федерация, МПК F24D 3/02. Система отопления здания зависимого присоединения с организацией в ней пульсирующего режима движения теплоносителя : № 2020133525 : заявл. 13.10.2020 : опубл. 19.04.2021 / А. П. Левцев, Е. С. Лапин, А. А. Голянин, Р. В. Панкратьев ; заявитель Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва.
4. Термическое сопротивление наружных ограждающих конструкций при переменном тепловом потоке / В. Т. Ерофеев, Т. Ф. Ельчищева, А. П. Левцев [и др.] // Промышленное и гражданское строительство. – 2022. – № 10. – С. 4–13. – DOI 10.33622/0869-7019.2022.10.04-13.
5. Панфилов, С. А. Метод исследования параметров теплового режима помещения здания для настройки энергоэффективной системы отопления / С. А. Панфилов, О. В. Кабанов, В. Т. Ерофеев // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году : сборник научных трудов / Российская академия архитектуры и строительных наук. – Москва : АСВ, 2022. – Том 2. – С. 310–320.
6. Патент № 2781893 С1 Российская Федерация, МПК F24D 15/00, G05D 23/00. Способ определения минимального времени включения системы отопления на нагрев помещения здания : № 2021135973 : заявл. 07.12.2021 : опубл. 19.10.2022 / О. В. Кабанов, С. А. Панфилов ; заявитель Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617121 Российская Федерация. Программа адаптивного управления тепловым режимом помещения здания : № 2022615826 : заявл. 06.04.2022 : опубл. 18.04.2022 / О. В. Кабанов, С. А. Панфилов ; заявитель Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва.



8. Кабанов, О. В. Совершенствование режимов подачи энергоносителя в системах автономного отопления производственных помещений зданий : специальность 2.1.3 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кабанов Олег Владимирович ; Волгоградский государственный технический университет. – Волгоград, 2022. – 169 с.

9. Конструктивные особенности и оценка работы оборудования для импульсной подачи теплоносителя / А. П. Левцев, Е. С. Лапин, М. В. Бikuнова, В. В. Салмин // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 4 (37). – С. 151–158.

10. Кашуркин, А. Ю. Оптимизация конструкции горизонтальных систем водяного отопления с этажными станциями / А. Ю. Кашуркин, С. М. Усиков // Инновации и инвестиции. – 2024. – № 12. – С. 381–386.

11. Панфилов, С. А. Устройство для энергосберегающего управления отоплением автономного помещения здания / С. А. Панфилов, В. Т. Ерофеев, О. В. Кабанов // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году : сборник научных трудов / Российская академия архитектуры и строительных наук. – Москва : АСВ, 2022. – Том 2. – С. 300–309.

12. Лапин, Е. С. Разработка пульсирующих режимов подачи теплоносителя в системах отопления зданий с секционными радиаторами : специальность 2.1.3 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лапин Евгений Евгеньевич ; [Место защиты : Волгоградский государственный технический университет]. – Волгоград, 2023. – 152 с. : ил.

13. Measuring the thermo physical properties of construction projects / O. V. Kabanov, S. A. Panfilov, A. A. Prokin, E. S. Sergushina // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. – 2019. – Vol. 16, № 7. – P. 3121–3127. – DOI 10.1166/jctn.2019.8229.

LAPIN Evgeniy Sergeevich¹, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of thermal power systems; LEVTSEV Aleksey Pavlovich¹, doctor of technical sciences, professor of the chair of thermal power systems; SERGUSHINA Elena Sergeevna¹, deputy director of academic affairs of the multidisciplinary college; PANFILOV Stepan Aleksandrovich¹, doctor of technical sciences, professor of the chair of electronics and electrical engineering; KABANOV Oleg Vladimirovich¹, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of electronics and electrical engineering; KASHURKIN Aleksey Yuryevich, head of the Laboratory², senior teacher³; USIKOV Sergey Mikhailovich, researcher², candidate of technical sciences, associate professor³

EFFECT OF OSCILLATING FLOW ON HEAT TRANSFER

¹National Research Ogarev Mordovia State University.
68/1, Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Republic of Mordovia, Russia.
Tel.: (8342) 24-37-32; e-mail: mrsu@mrsu.ru

²Scientific Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Constructions Sciences (RAACS).
21, Lokomotivny Proezd, Moscow, 127238, Russia.
Tel.: (495) 482-40-76; e-mail: niisf@niisf.ru

³Moscow State University of Civil Engineering.
26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russia.
E-mail: leontiii@mail.ru; usikov-work@yandex.ru

Key words: heat transfer, pulsating flow, heat transfer coefficient, oscillatory mode, shell-and-tube heat exchanger, Nusselt number, Reynolds analogy, pulse technologies, hydrodynamics.



The presented work studies the effect of pulsating fluid flow on the efficiency of heat transfer in various types of heat exchangers. Based on the analysis of B. M. Galitsensky's monograph and R. Keil's experimental data, it was established that the transition from a stationary to a pulsating flow regime increases the heat transfer coefficient. Experimental studies were conducted on shell-and-tube and plate heat exchangers, as well as in a pipe-in-pipe system. The results show that at certain oscillation frequencies (0,1–2 Hz) and velocity amplitudes, the heat transfer coefficient increases by up to 1,8 times. The maximum increase in efficiency (up to 30 %) is observed in plate heat exchangers, but there is a significant variation in data in the pulse mode. Promising schemes for using pulse technologies in heating systems are discussed. The limitations associated with hydraulic losses and design complexity have been identified, which requires further improvement of the equipment [1, 2].

REFERENCES

1. Patent № 2716545 C1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F24D 3/00, F24D 17/00. Sistema teplosnabzheniya i sposob organizatsii ee raboty [Heat supply system and method of organizing its operation] : № 2019131243 : zayavl. 03.10.2019 : opubl. 12.03.2020 / A. P. Levcev, E. S. Laping, A. A. Golyanin [et al.] ; Natsionalny issledovatel'skiy Mordovskiy gosudarstvennyy universitet im. N. P. Ogareva.
2. Patent № 2754569 C1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F24D 3/02. Sistema otopeniya zdaniya nezavisimogo prisoedineniya s organizatsiyey v ney pulsiruyushchego rezhima dvizheniya teplonositelya [Building heating system of independent connection with the organization of a pulsating mode of heat carrier movement in it] : № 2020134571 : zayavl. 21.10.2020 : opubl. 03.09.2021 / A. P. Levcev, A. A. Golyanin, E. S. Laping ; Natsionalny issledovatel'skiy Mordovskiy gosudarstvennyy universitet im. N. P. Ogareva.
3. Patent № 2746638 C1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F24D 3/02. Sistema otopeniya zdaniya zavisimogo prisoedineniya s organizatsiyey v ney pulsiruyushchego rezhima dvizheniya teplonositelya [Building heating system of dependent connection with the organization of a pulsating mode of heat carrier movement in it] : № 2020133525 : zayavl. 13.10.2020 : opubl. 19.04.2021 / A. P. Levcev, E. S. Laping, A. A. Golyanin, R. V. Pankratev ; Natsionalny issledovatel'skiy Mordovskiy gosudarstvennyy universitet im. N. P. Ogareva.
4. Yerofeyev V. T., Yelchishcheva T. F., Levcev A. P. [et al.]. Termicheskoye soprotivleniye naruzhnykh ograzhdayushchikh konstruktov pri peremennom teplovom potoke [Thermal resistance of external enclosing structures under variable heat flow]. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. Moscow, 2022, № 10, P. 4–13. DOI 10.33622/0869-7019.2022.10.04-13.
5. Panfilov S. A., Kabanov O. V., Yerofeyev V. T. Metod issledovaniya parametrov teplovogo rezhima pomeshcheniya zdaniya dlya nastroyki energoэффективной sistemy otopleiya [Method for studying the parameters of the thermal regime of a building premises for setting up an energy-efficient heating system]. Fundamentalnye, poiskovye i prikladnye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noy otrasli Rossiyskoy Federatsii v 2021 godu [Fundamental, exploratory and applied research of RAACS for scientific support of the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2021]: sbornik nauchnykh trudov. Rossiyskaya akademiya arkhitektury i stroitel'nykh nauk. Moscow, 2022, Vol. 2, P. 310–320.
6. Patent № 2781893 C1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F24D 15/00, G05D 23/00. Sposob opredeleniya minimalnogo vremeni vklyucheniya sistemy otopleiya na nagrev pomeshcheniya zdaniya [Method for determining the minimum turn-on time of the heating system for heating a building premises] : № 2021135973 : zayavl. 07.12.2021 : opubl. 19.10.2022 / O. V. Kabanov, S. A. Panfilov ; Natsionalny issledovatel'skiy Mordovskiy gosudarstvennyy universitet im. N. P. Ogareva.



7. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2022617121 Rossiyskaya Federatsiya [Certificate of state registration of a computer program No. 2022617121 Russian Federation]. Programma adaptivnogo upravleniya teplovym rezhimom pomeshcheniya zdaniya [Program for adaptive control of the thermal regime of a building premises] : № 2022615826 : zayavl. 06.04.2022 : opubl. 18.04.2022 / O. V. Kabanov, S. A. Panfilov ; Natsionalny issledovatel'skiy Mordovskiy gosudarstvennyy universitet im. N. P. Ogareva.

8. Kabanov O. V. Sovershenstvovaniye rezhimov podachi energonositelya v sistemakh avtonomnogo otopleya proizvodstvennykh pomeshcheniy zdaniy [Improvement of energy carrier supply modes in autonomous heating systems of industrial premises of buildings] : spetsialnost 2.1.3 : diss. ... kand. tekhn. nauk ; Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet. Volgograd, 2022, 169 p.

9. Levcev A. P., Laping E. S., Bikunova M. V., Salmin V. V. Konstruktivnye osobennosti i otsenka raboty oborudovaniya dlya impul'snoy podachi teponositelya [Design features and performance evaluation of equipment for pulse supply of heat carrier]. Regionalnaya arkhitektura i stroitel'stvo [Regional Architecture and Construction]. Volgograd, 2018, № 4 (37), P. 151–158.

10. Kashurkin A. Yu., Usikov S. M. Optimizatsiya konstruktsii gorizontalnykh sistem vodianogo otopleya s etazhnymi stantsiyami [Optimization of the design of horizontal water heating systems with floor stations]. Innovatsii i investitsii [Innovations and Investments]. Moscow, 2024, № 12, P. 381–386.

11. Panfilov S. A., Yerofeyev V. T., Kabanov O. V. Ustroystvo dlya energosberegayushchego upravleniya otopleyem avtonomnogo pomeshcheniya zdaniya [Device for energy-saving control of heating of an autonomous building premises]. Fundamentalnye, poiskovye i prikladnye issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noy otrasli Rossiyskoy Federatsii v 2021 godu [Fundamental, exploratory and applied research of RAACS for scientific support of the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2021]: sbornik nauchnykh trudov. Rossiyskaya akademiya arkhitektury i stroitel'nykh nauk. Moscow, 2022, Vol. 2, P. 300–309.

12. Laping E. S. Razrabotka pulsiruyushchikh rezhimov podachi teponositelya v sistemakh otopleya zdaniy s sektiionnymi radiatorami [Development of pulsating modes of heat carrier supply in building heating systems with sectional radiators] : spetsialnost 2.1.3 : diss. ... kand. tekhn. nauk ; Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet. Volgograd, 2023, 152 p.

13. Kabanov O. V., Panfilov S. A., Prokin A. A., Sergushina E. S. Measuring the thermo physical properties of construction projects. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. 2019, Vol. 16, № 7, P. 3121–3127. DOI 10.1166/jctn.2019.8229.

© Е. С. Лапин, А. П. Левцев, Е. С. Сергушина, С. А. Панфилов, О. В. Кабанов,
А. Ю. Кашуркин, С. М. Усиков, 2026

Получено: 12.02.2026 г.