

УДК 536.24

**Айгуль Ильгизаровна Хайбуллина**

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий, строительства зданий и сооружений, Россия, Казань, (8843) 519-42-06, e-mail: haybullina.87@mail.ru

**Айдар Рафаэлевич Хайруллин**

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», аспирант кафедры энергообеспечения предприятий, строительства зданий и сооружений, Россия, Казань, (8843) 519-42-06, e-mail: kharullin@yandex.ru

**Владимир Кузьмич Ильин**

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», доктор технических наук, профессор кафедры энергообеспечения предприятий, строительства зданий и сооружений, Россия, Казань, (8843) 519-42-06, e-mail: ilyinvk@mail.ru

## **Экспериментальное исследование осциллирующего течения в трубном пучке<sup>1</sup>**

### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Осциллирующие течения с возвратно поступательным потоком встречаются в различных инженерных приложениях. На сегодняшний день механизмы осциллирующих течений изучены недостаточно. Осциллирующие течения могут создаваться искусственно для повышения теплообменного оборудования за счет интенсификации теплообмена. В связи с этим представляет интерес исследование характеристик потока и теплообмена пучка труб при осциллирующем потоке.

**Материалы и методы.** Оценка теплообмена и гидродинамической картины течения в пучке при осцилляциях потока проведена на основе экспериментальных исследований. Осцилляции потока созданы с помощью пневматической системы, приводящей в действие пульсатор. Регистрация временной характеристики перепада давления пучка осуществлена с помощью осциллографа и передников давления. Для оценки динамики скорости потока использован метод скоростной съемки. Теплообмен пучка определен по затрачиваемой электрической мощности на поддержание постоянной температуры в трубном пространстве пучка.

**Результаты.** Впервые экспериментальным методом исследован теплообмен и гидродинамическая картина течения с несимметричными осцилляциями потока в коридорном пучке труб. Показано, что форма осцилляций скорости потока и перепада давления зависит от частоты. Установлено, что с ростом частоты происходит увеличение значений скорости потока и перепада давления. Определено, что для отдельных моментов времени скорость и перепад давления при несимметричных осцилляциях превосходят симметричные. Установлено увеличение теплового потока пучка с ростом частоты в 1,7 раза. Показано, что для интенсификации теплообмена несимметричные осцилляции эффективнее симметричных в среднем в 1,1 раза.

**Выводы.** Анализ полученных результатов показал возможность интенсификации теплообмена в пучке труб при применении осциллирующих течений. Таким образом, осциллирующие течения могут быть использованы для повышения эффективности теплообменного оборудования. Полученные результаты по гидродинамической картине течения могут использоваться при математическом моделировании осциллирующих течений в целях расширения режимных параметров исследования с определением наиболее эффективных.

**Ключевые слова:** осцилляции потока, перепад давления, интенсификация теплоотдачи, трубный пучок, несимметричные осцилляции, пульсации потока

**Aigul Ilgizarovna Khaibullina**

Kazan State Power Energy University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures Department, Russia, Kazan, telephone (8843) 519-42-06, e-mail: haybullina.87@mail.ru

**Aydar Rafaelevich Khayrullin**

Kazan State Power Energy University, Postgraduate Student of Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures Department, Russia, Kazan, telephone (8843) 519-42-06, e-mail: kharullin@yandex.ru

**Vladimir Kuzmich Ilyin**

Kazan State Power Energy University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures Department, Russia, Kazan, telephone (8843) 519-42-06, e-mail: ilyinvk@mail.ru

<sup>1</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда 23-29-00845, [rscf.ru/project/23-29-00845/](https://rscf.ru/project/23-29-00845/). The research is carried out with financial support of the Russian Science Foundation grant 23-29-00845, [rscf.ru/project/23-29-00845/](https://rscf.ru/project/23-29-00845/).

## Experimental study of oscillating flow in tube bundle

### Abstract

**Background.** Oscillating reciprocating flows are found in a variety of engineering applications. The mechanisms of oscillating flows have not been sufficiently studied. Oscillating flows can be created artificially to increase heat transfer equipment by intensifying heat transfer. Thus, this paper studies the flow and heat transfer characteristics of a tube bundle under the influence of oscillating flow.

**Materials and methods.** The assessment of heat transfer and the hydrodynamic flow pattern in a tube bundle during flow oscillations is carried out on the basis of experimental studies. Flow oscillations have been created by a pneumatic system that drove a pulsator. The time characteristic of the pressure drop of the tube bundle has been recorded using an oscilloscope and pressure drop sensors. To assess the dynamics of flow velocity, the high-speed shooting method is used. The heat exchange of a tube bundle has been determined by the electrical power expended to maintain a constant temperature on the tube side of the bundle.

**Results.** For the first time, heat transfer and the hydrodynamic flow pattern with asymmetrical flow oscillations in an in-line tube bundle are studied experimentally. It is shown that the shape of oscillations of flow velocity and pressure drop depend on frequency. It has been found that with increasing frequency there is an increase in the values of flow velocity and pressure drop. It has been determined that for certain moments of time, the flow velocity and pressure drop during asymmetrical oscillations exceed symmetrical ones. It has been established that the heat transfer rate of a bundle increases by 1,7 times with an increase in frequency. It has been shown that asymmetrical oscillations are more effective in intensifying heat transfer than symmetrical ones by an average of 1,1 times.

**Conclusions.** Analysis of the results obtained has showed the possibility of intensifying heat transfer in a tube bundle using oscillating flows. Thus, oscillating flows can be used to increase the efficiency of heat exchange equipment. The results obtained on the hydrodynamic flow pattern can be used in mathematical modeling of oscillating flows, which are necessary to expand the operating parameters of the study and determine the most effective ones.

**Key words:** oscillation flow, pressure drop, heat transfer enhancement, tube bundle, asymmetrical oscillation, flow pulsation

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2023.6.029-037

**Введение.** Повышение эффективности теплообменного оборудования тесно связано с различными методами интенсификации теплообмена. Одним из таких методов является пульсация потока, которая создается искусственно в целях интенсификации теплообмена. Нестационарные течения также могут возникать самопроизвольно, например, при обтекании трубок теплообменника [1] или в каналах насосного оборудования [2], что вызывает вибрацию и может приводить к различным повреждениям.

Вынужденное нестационарное течение имеет более сложные механизмы интенсификации теплообмена по сравнению со стационарным течением и поэтому является менее изученным. Искусственное нестационарное течение можно разделить на два основных типа: осциллирующее течение без направленного течения и пульсационное течение с направленным течением. Направленное пульсационное течение состоит из стационарного течения и колебательной составляющей. В таком течении стационарный направленный поток подвергается колебаниям. Осциллирующее течение не имеет стационарной составляющей, в таком течении расход, осредненный за период осцилляции, равен нулю.

Как пульсационные течения с направленным потоком, так и осциллирующие течения широко используются для интенсификации теплообмена в различных инженерных приложениях [3]. Теплообменные аппараты с пучками труб распространены во многих отраслях промышленности, поэтому поперечное обте-

кание пучков труб и одиночного цилиндра остается классической задачей многие десятилетия. Несмотря на то что стационарное течение при обтекании одиночного цилиндра и пучков труб хорошо изучено [4, 5], пульсирующее, или осциллирующее, течение, созданное искусственно, изучено в меньшей степени [6, 7]. В [8] исследован эффект пульсирующего течения при осциллирующем цилиндре численным методом и установлено, что сила лобового сопротивления уменьшается с увеличением амплитуды и уменьшением безразмерной частоты осцилляций цилиндра. В [9] исследован теплообмен цилиндра в пульсирующем потоке экспериментальным методом и получено значительное увеличение теплообмена в следе цилиндра. При численном исследовании пульсирующего потока при обтекании прямоугольного цилиндра авторы [10] также зафиксировали увеличение теплообмена. В [11] исследован теплообмен квадратной трубы при пульсирующем потоке и установлено увеличение теплообмена вдвое, при этом рост мощности на прокачку увеличивается втрое. Другие исследования, как экспериментальные [12], так и численные [13], показали возможность интенсификации теплообмена поперечно обтекаемого цилиндра в условиях пульсирующего течения. Многие авторы исследовали теплообмен осциллирующего цилиндра. В [14] проведено экспериментальное исследование теплообмена осциллирующего цилиндра по потоку, который по характеру ближе к вибрациям, и получено заключение,

что даже при минимальных амплитудах достигается интенсификация теплообмена.

При осцилляции цилиндра амплитуда обычно имеет значения, не превышающие одного диаметра, однако при осцилляциях потока с низкими частотами амплитуда может быть больше и достигать десяти диаметров (такие течения могут встречаться, например, на морских нефтяных платформах). Теплообменные и гидродинамические характеристики высокоамплитудных осцилляций могут существенно отличаться от низкоамплитудных осцилляций цилиндра. В [15] исследован теплообмен цилиндра в условиях осциллирующего потока. Результаты показали, что осцилляции скорости близки к синусоидальным с незначительным отклонением от гармонических при достижении максимальных значений во время обратного течения. В [16] проведены схожие с [15] исследования относительно пучков труб: пучок труб был погружен в бассейн с осциллирующим потоком – более высокие волны увеличивали среднюю скорость, но период волны явного влияния не оказывал. Интенсификация теплообмена при пульсирующих течениях с направленным течением в пучках труб получена в [17–19]. Обычно в таких исследованиях характер пульсаций скорости близок к гармоническому без разворота потока, соответственно, амплитуда пульсаций существенно меньше, чем в осциллирующем потоке, при этом частота выше.

Теплообмен при осцилляциях в пористых средах близок к течению при обтекании пучков труб. Данные при течении в пористых средах можно использовать при обтекании пучков труб. Как и в пучках труб, осциллирующие течения в пористых средах приводят к интенсификации теплообмена [20–22].

Осциллирующие течения с низкой частотой позволяют достигать более высоких значений амплитуд в связи отсутствием стационарной составляющей. Обычно интенсификация теплообмена пропорциональна повышению амплитуды, что не всегда справедливо для повышения частоты. С другой стороны, отсутствие стационарной составляющей позволяет расширить режимные параметры осциллирующего потока для более детального исследования таких течений. На сегодняшний день работы с возвратно поступательным осциллирующим течением в пучках труб имеют ограниченный характер, при этом характер осцилляций в основном близок к симметричному. Характер пульсаций может быть несимметричным, такие пульсации могут быть эффективнее с точки зрения интенсификации теплообмена [23, 24] и иметь другие гидродинамические характеристики. Поэтому в данной работе рассмотрены низкочастотные осцилляции потока в коридорном пучке труб с симметричным и несимметричным

характером и амплитудами значительно выше диаметра трубок, исследованы скорости, перепад давления и теплообмен в условиях осциллирующего потока в пучке труб.

**Методы исследования.** Экспериментальные исследования осциллирующих течений в пучке труб проводились на испытательном теплообменнике (рис. 1), который представляет собой одноходовой кожухотрубчатый теплообменник с перекрестным током теплоносителя. Наружный и внутренний диаметр трубок – 10 и 8 мм соответственно, относительный продольный  $S_L$  и поперечный шаг  $S_T$  трубок – 1,3. Для измерения температур использовались датчики сопротивления ДТС Pt1000 с точностью  $\pm 0,3$  °С.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. Экспериментальная установка состоит из нескольких контуров. В греющем контуре циркуляционный насос подает воду в электронагревательный котел, далее теплоноситель поступает в трубное пространство тестового теплообменника, где охлаждается и возвращается обратно в насос. Температура на выходе из котла поддерживалась постоянной с помощью твердотельного реле, которым регулировалась мощность котла. В обогреваемом контуре теплоноситель находится в межтрубном пространстве испытательного теплообменника и подвергается воздействию осцилляций потока с заданной частотой, амплитудой и скважностью осцилляций. Экспериментальная установка также оснащена пластинчатым теплообменником, посредством которого осуществляется охлаждение воды в обогреваемом контуре.

Осцилляции потока создавались с помощью системы генерации осцилляций, которая состоит из пульсатора, пневмоцилиндра, электромагнитного клапана, ресивера и компрессора. Пульсатор представляет собой обечайку с расположенным в нем поршнем. Внутренний диаметр обечайки пульсатора составляет 150 мм, длина 250 мм. Диаметр поршня – 149,5 мм, толщина – 30 мм. Поршень пульсатора уплотнен двумя резиновыми кольцами наружным диаметром 152 мм. Поршневая и штоковая область пульсатора совмещена с входом и выходом межтрубного пространства испытательного теплообменника. Шток пневмоцилиндра внутренним диаметром 100 мм и длиной хода 200 мм совмещен с пульсатором. Пневмоцилиндр приводит в действие поршень пульсатора за счет давления сжатого воздуха. Пятиходовой двухпозиционный электромагнитный клапан AirTAC 4V420-15 служит для подачи сжатого воздуха в поршневую и штоковую область пневмоцилиндра. Ресивер объемом 100 л поддерживает стабильное давление в пневмоцилиндре. Воздушный компрессор служит для подачи сжатого воздуха в ресивер.

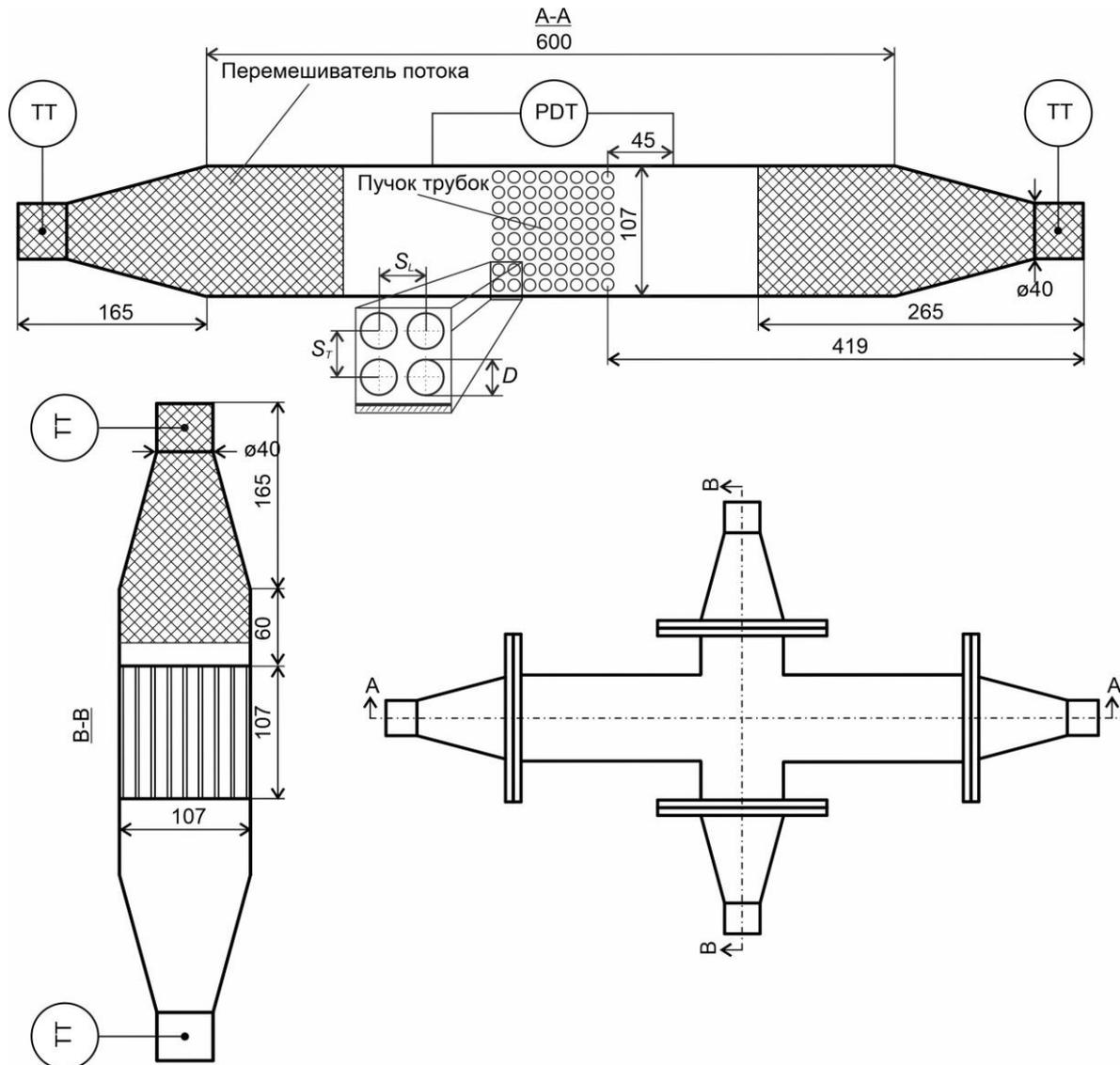


Рис. 1. Испытательный теплообменник

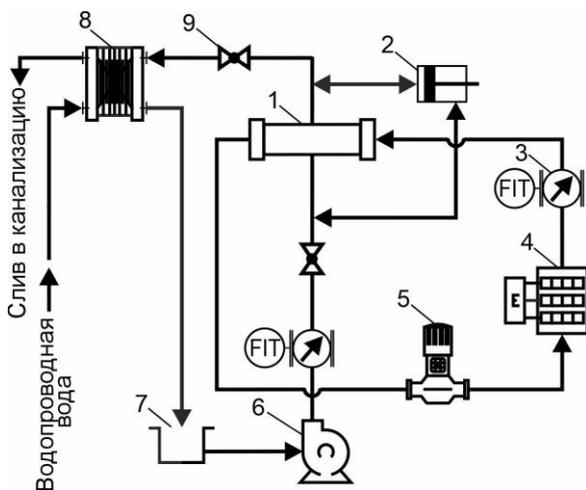


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – испытательный теплообменник; 2 – система генераций осцилляций; 3 – расходомер; 4 – электронагревательный котел; 5 – циркуляционный насос; 6 – центробежный насос; 7 – открытая емкость; 8 – пластинчатый теплообменник; 9 – шаровой кран

Частота осцилляций  $f = 1/T$  Гц задавалась временем периода осцилляций, который состоял из суммы двух полупериодов  $T = T_1 + T_2$ , с.

Экспериментальное исследование осциллирующих течений проводилось как при симметричных, так и при несимметричных осцилляциях. При симметричных осцилляциях время подачи сжатого воздуха в поршневую и штоковую полость пульсатора было одинаковым, соответственно при несимметричных осцилляциях данное время было различным.

Характер осцилляции описывался скважностью  $\psi = T_1/T$ .

Безразмерная относительная амплитуда осцилляций рассчитывалась как отношение амплитуды к диаметру трубки пучка труб  $A/D$ . Необходимая амплитуда осцилляций регулировалась величиной давления в ресивере. Текущее значение амплитуды контролировалось по смещению штока пульсатора.

Экспериментальное исследование проводилось в два этапа. На первом шаге произ-

водилась стабилизация температур в межтрубном и трубном пространстве пучка труб. В трубном пространстве вода нагревалась до 65 °С с последующим поддержанием постоянной температуры. В межтрубном пространстве вода охлаждалась до 38 °С посредством пластинчатого теплообменника, теплосъем с которого производился водопроводной водой. Расход воды в трубном и межтрубном пространстве при каждом опыте был одинаковым и контролировался двумя расходомерами ПитерФлоу РС32-30-А с относительной погрешностью  $\pm 1\%$ . На втором шаге выключался центробежный насос и закрывались шаровые краны, показанные на схеме рис. 2. После устанавливался режим осцилляций потока в пучке труб с заданной частотой, амплитудой и скважностью. При этом в ресивере уже было установлено давление, соответствующее необходимой амплитуде и частоте осцилляций. Далее в течение 20 минут измерялась потребляемая мощность электронагревательного котла с помощью счетчика электрической мощности Mercury 231 AM-01 с абсолютной погрешностью  $\pm 5$  Вт. По потребляемой электрической мощности электронагревательного котла оценивался тепловой поток  $Q$  испытательного теплообменника. Перепад давления  $\Delta P$  в пучке труб измерялся за несколько периодов осцилляций в пучке труб. В зависимости от режима осцилляций использовались три дифференциальных датчика давления с номиналом  $\pm 200$ ,  $\pm 500$  и  $\pm 1000$  Па и относительной погрешностью  $\pm 0,5\%$ . Для оценки изменения средней скорости в пучке труб перемещение штока пульсатора записывалось на камеру с частотой 50 кадров в секунду.

Анализ погрешности величин проводился по известным методикам [25]. Относительная погрешность амплитуды осцилляций  $A$  не превышала  $\pm 14,7\%$ , для скорости  $u$  и теплового потока  $Q$  относительная погрешность не превышала  $\pm 16,3$  и  $\pm 6\%$  соответственно.

**Результаты исследования.** Исследование характеристик теплообмена и гидродинамики в пучке труб проводилось в диапазоне частот от 0,2 до 0,65 Гц. Амплитуда осцилляций потока  $A$ , отнесенная к диаметру трубки  $D$ , имела постоянное значение  $A/D = 18$ . Исследования проводились при несимметричных и симметричных осцилляциях потока при скважности  $\psi = 0,25$  и  $\psi = 0,5$  соответственно.

На рис. 3, 4 показано изменение скорости потока в пучке труб при симметричных и несимметричных осцилляциях потока с различной частотой и постоянной амплитудой. Скорость потока приведена для одного периода осцилляций в зависимости от времени  $\tau$ , отнесенного к периоду осцилляций  $T$ .

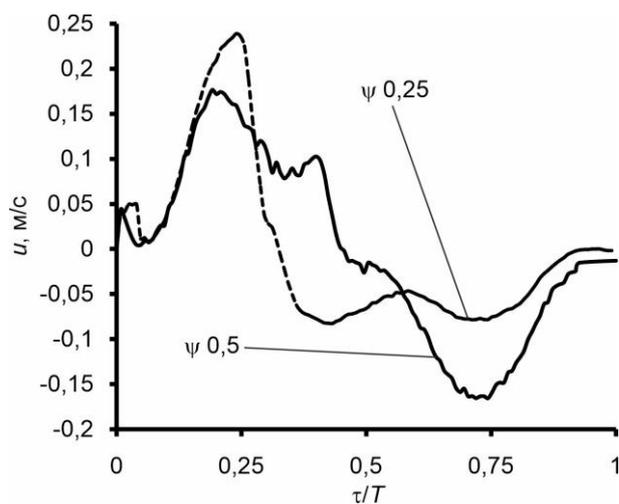


Рис. 3. Скорость потока при частоте  $f = 0,2$  Гц

Когда частота осцилляций была минимальна  $f = 0,2$  Гц (рис. 3), максимальная абсолютная скорость потока была выше при несимметричных осцилляциях. В начальной фазе осцилляций при  $\tau/T < 0,048$  происходило увеличение скорости до  $u = 0,05$  м/с, после скорость вновь снижалась до нуля, что связано с торможением поршня пульсатора из-за трения между кольцами поршня и стенками пульсатора. Абсолютная максимальная скорость потока, как при симметричных, так и при несимметричных осцилляциях, наблюдалась при фазе  $\tau/T$  около 0,25, при этом скорость была выше при  $\psi = 0,25$ . Для фаз осцилляций  $\tau/T > 0,25$  сначала происходило снижение скорости, после — разворот потока. Для  $\psi = 0,25$  разворот потока происходил при  $\tau/T = 0,38$ , для  $\psi = 0,5$  — при  $\tau/T = 0,51$ . Разворот потока соответствовал второму полупериоду осцилляций  $T_2$ . Очевидно, что при несимметричных осцилляциях обратный поток соответствовал большему периоду времени, при этом абсолютная скорость потока была ниже, чем при симметричных осцилляциях. Максимальная абсолютная скорость потока при несимметричных осцилляциях была  $u = 0,24$  м/с, при симметричных осцилляциях —  $u = 0,16$  м/с.

При частоте осцилляций  $f = 0,65$  Гц (рис. 4) абсолютная скорость потока во время первого полупериода выше при несимметричных осцилляциях, при симметричных — выше во время второго полупериода осцилляций. Абсолютная максимальная скорость потока при несимметричных и симметричных осцилляциях во время первого полупериода составила  $u = 0,58$  м/с и  $u = 0,37$  м/с для фаз  $\tau/T = 0,18$  и  $\tau/T = 0,21$  соответственно. При развороте потока и несимметричных осцилляциях абсолютная максимальная скорость потока  $u = 0,29$  м/с наблюдалась при фазе  $\tau/T = 0,56$ , при симметричных —  $u = 0,38$  м/с при  $\tau/T = 0,7$ .

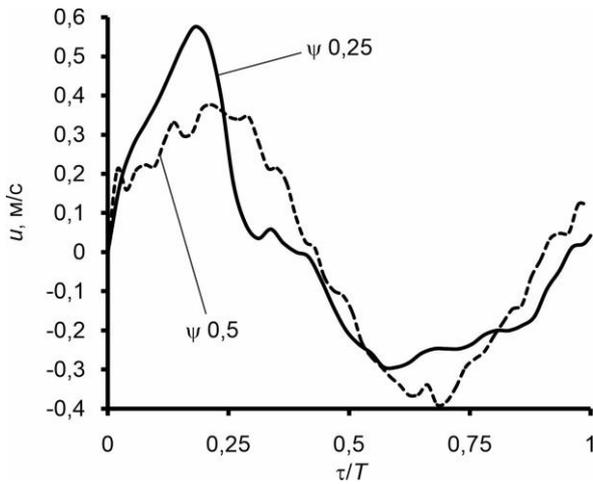


Рис. 4. Скорость потока при частоте  $f = 0,65$  Гц

На рис. 5, 6 показаны перепады давления в пучке труб при несимметричных и симметричных осцилляциях различной частоты и амплитуде  $A/D=18$ , анализ которых показывает, что перепад давления зависит от частоты и скважности. При частоте осцилляций  $f = 0,2$  Гц (рис. 5) при несимметричных осцилляциях перепад давления в основном был выше, чем при симметричных. В первый полупериод осцилляций при  $\tau/T < 0,25$ , как при несимметричных, так и при симметричных, происходил рост перепада давления. При  $\tau/T = 0,95$  при симметричных осцилляциях происходил резкий рост перепада давления, что связано с ударом поршня пневмоцилиндра в конце периода осцилляций. Шток пневмоцилиндра выдвигался за заданную амплитуду во время первого полупериода осцилляций, во время второго полупериода возвращался назад до момента удара о корпус пневмоцилиндра, что вызывало дополнительные колебания потока в пучке труб. При несимметричных осцилляциях максимальное значение перепада давления  $\Delta P = 185$  Па наблюдалось при фазе  $\tau/T = 0,28$ , после происходило снижение  $\Delta P$ , поскольку происходил разворот потока в пучке труб. Во время разворота потока, которое соответствовало второму полупериоду, абсолютное значение  $\Delta P$  достигало 116 Па при фазе  $\tau/T = 0,33$ . Для моментов времени  $\tau/T > 0,36$  значение  $\Delta P$  при несимметричных осцилляциях было близко к значению при симметричных. В конце второго полупериода осцилляций при несимметричных осцилляциях наблюдалось увеличение  $\Delta P$ , что также связано с ударом поршня пневмоцилиндра о его корпус.

С увеличением частоты  $f$  до 0,65 Гц (рис. 6) перепад давления  $\Delta P$  также увеличивался. При симметричных осцилляциях форма перепада давления была ближе к прямоугольной. При несимметричных осцилляциях во время первого полупериода происходило постоянное повышение перепада давления  $\Delta P$ , во вре-

мя второго полупериода – резкое понижение  $\Delta P$ , затем стабилизация  $\Delta P$  – около 200 Па. Абсолютное максимальное значение  $\Delta P = 860$  Па для несимметричных осцилляций наблюдалось во время первого полупериода при фазе  $\tau/T = 0,37$ , для симметричных осцилляций – во время второго полупериода и составляло  $\Delta P = 605$  Па при  $\tau/T = 0,89$ .

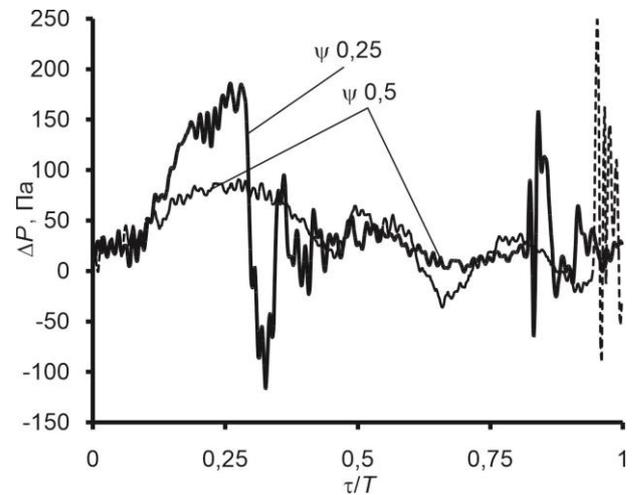


Рис. 5. Мгновенные значения перепада давления при частоте  $f = 0,2$  Гц

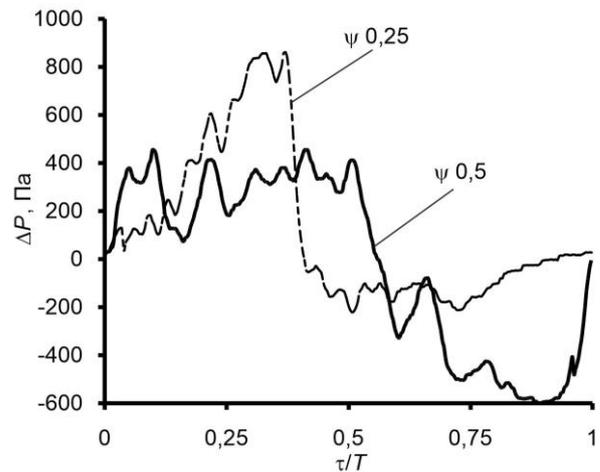


Рис. 6. Мгновенные значения перепада давления при частоте  $f = 0,65$  Гц

Увеличение частоты осцилляций приводило к увеличению скорости и перепаду давления, что согласуется с ранее полученными результатами [16, 22, 26, 27]. Максимальные абсолютные значения перепада давления и скорости выше при несимметричных осцилляциях. Максимальные значения перепада давления  $\Delta P$  в пучке труб коррелируются с максимальными скоростями, однако форма осцилляций различается. При симметричных осцилляциях в [22, 27] форма скорости и перепада давления была близка к гармоническим осцилляциям, что не согласуется с нашими результатами. Однако в [22, 27]

в качестве рабочей среды использовался воздух, в нашем исследовании мы использовали воду. В [26] также в качестве рабочей среды использовалась вода, при этом форма перепада давления не имела гармонического характера. Другая причина различия форм скорости и перепада давления при симметричных осцилляциях связана с иным методом генерации осцилляций, что позволяет также генерировать несимметричные осцилляции. В других исследованиях для генераций симметричных осцилляций в основном применяется кривошипно-шатунный механизм, движение которого описывается синусоидой. В нашем исследовании поршень пульсатора совершает возвратно-поступательное движение с резкими разворотами в связи с переключением управляющего двухпозиционного электромагнитного клапана.

Эффективность нагрева при осциллирующем потоке оценивалась посредством измерения потребляемой электрической мощности котла для поддержания постоянной температуры 65 °С в трубном пространстве тестового теплообменника при начальной температуре в межтрубном пространстве 38 °С.

На рис. 7 показана зависимость теплового потока от частоты при симметричных и несимметричных осцилляциях. Анализ зависимостей показывает, что увеличение частоты приводит к повышению теплового потока как при симметричных, так и при несимметричных осцилляциях. Данная тенденция коррелирует с другими результатами [15, 16, 21], полученными при симметричных осцилляциях.

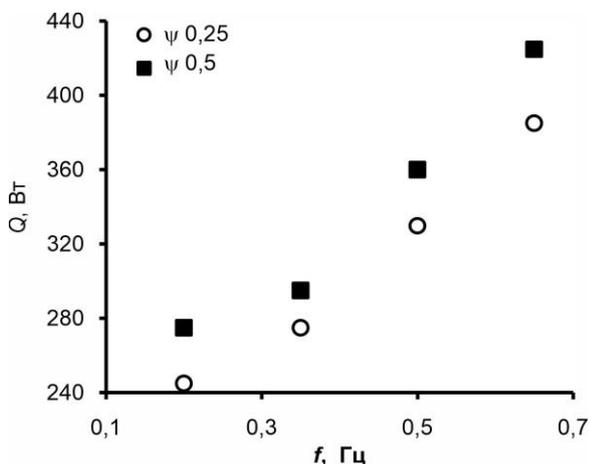


Рис. 7. Зависимость теплового потока от частоты

При всех частотах эффективность нагрева при несимметричных осцилляциях превосходила эффективность при симметричных осцилляциях. Например, при минимальной частоте  $f = 0,2$  Гц значение  $Q$  при симметричных осцилляциях составило 245 Вт, при несимметричных осцилляциях – 275 Вт. Когда частота была максимальной  $f = 0,65$  Гц, значение  $Q$  составило 385 и 425 Вт соответственно. Увеличение  $Q$  с ростом частоты

$f$  от 0,2 до 0,65 Гц при симметричных и несимметричных осцилляциях было одинаковым и составляло 1,7 раза, при этом несимметричные осцилляции при фиксированной частоте в среднем были эффективнее в 1,1 раза.

Эффективность несимметричных пульсаций с направленным потоком была показана в пористых средах [28] и пучках труб [23], что согласуется с нашим исследованием. Увеличение теплообмена при несимметричных осцилляциях можно связать с формой скорости и перепада давления. При несимметричных осцилляциях наблюдается локальное увеличение значений скорости и перепада давления, превосходящее увеличение при симметричных осцилляциях, что способствует более интенсивному перемешиванию потока в пучке труб.

**Выводы.** Результаты показали, что форма скорости потока различается в зависимости от частоты и скважности осцилляций. При несимметричных осцилляциях форма скорости имеет сложный негармонический характер. При симметричных осцилляциях с увеличением частоты форма скорости становится ближе к гармонической. Абсолютные значения скорости потока выше при несимметричных осцилляциях во время первого полупериода, при симметричных осцилляциях – во время второго полупериода. Форма перепада давления, также как и скорости потока, существенно зависит от частоты и скважности осцилляций. Несмотря на то что перепад давления коррелирует с ростом скорости потока, форма осцилляций перепада давления различается. Увеличение частоты приводит к росту мгновенных значений перепада давления и скорости потока, как при симметричных, так и при несимметричных осцилляциях.

Эффективность теплообмена пучка труб возрастает с увеличением частоты осцилляций. Результаты исследований показали, что при увеличении частоты происходит рост теплового потока в 1,7 раза. Несимметричные осцилляции при фиксированной частоте оказались эффективнее симметричных осцилляций в среднем в 1,1 раза.

Полученные результаты подтверждают возможность повышения эффективности работы трубчатых теплообменных аппаратов за счет интенсификации теплообмена при вынужденной осцилляции потока.

Результаты исследования показывают, что гидродинамические характеристики течения не всегда могут быть описаны синусоидальными или прямоугольными функциями, что необходимо учитывать при математическом моделировании осциллирующих течений в теплообменных устройствах.

#### Список литературы

1. **Weaver D.S.** A review of cross-flow induced vibrations in heat exchanger tube array // J. Fluids Struct. – 1988. – Vol. 2. – P. 73–93.

2. **Unsteady** Pressure Pulsations in Pumps – A Review / N. Zhang, D. Li, B. Gao, et al. // *Energies*. – 2022. – Vol. 16, No. 1. – P. 150.
3. **Ibrahim K.A., Luk P., Luo Z.** Cooling of Concentrated Photovoltaic Cells – A Review and the Perspective of Pulsating Flow Cooling // *Energies*. – 2023. – Vol. 16, No. 6. – P. 2842.
4. **Zukauskas A.** Heat Transfer from Tubes in Crossflow // *Adv. Heat Transf.* – 1972. – Vol. 18. – P. 87–159.
5. **Nguyen Q.D., Lei C.** A PIV study of blockage ratio effects on flow over a confined circular cylinder at low Reynolds numbers // *Exp Fluids*. – 2023. – Vol. 64, No. 1. – P. 10.
6. **A critical review on pulsating flow in conventional fluids and nanofluids: Thermo-hydraulic characteristics** / M. Hemmat Esfe, M. Bahiraei, A. Torabi, M. Valadkhani // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2021. – Vol. 120. – P. 104859.
7. **Ye Q., Zhang Y., Wei J.** A comprehensive review of pulsating flow on heat transfer enhancement // *Applied Thermal Engineering*. – 2021. – Vol. 196. – P. 117275.
8. **Qamar A., Seda R., Bull J.L.** Pulsatile flow past an oscillating cylinder // *Physics of Fluids*. – 2011. – Vol. 23, No. 4. – P. 041903.
9. **Andraka C.E., Diller T.E.** Heat-Transfer Distribution Around a Cylinder in Pulsating Crossflow // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. – 1985. – Vol. 107, No. 4. – P. 976–982.
10. **Saxena A., Ng E.Y.K.** Steady and Pulsating Flow Past a Heated Rectangular Cylinder(s) in a Channel // *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. – 2018. – Vol. 32, No. 2. – P. 401–413.
11. **Martin E., Velazquez A., Valeije A.** Heat transfer downstream of a 3D confined square cylinder under flow pulsation // *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. – 2018. – Vol. 74, No. 12. – P. 1747–1769.
12. **Heat transfer from a cylinder in pulsating crossflow** / V.M. Molochnikov, N.I. Mikheev, A.N. Mikheev, A.A. Paereliy // *Thermophys. Aeromech.* – 2017. – Vol. 24, No. 4. – P. 569–575.
13. **Srivastava A., Dhiman A.** Pulsatile flow and heat transfer of shear-thinning power-law fluids over a confined semi-circular cylinder // *Eur. Phys. J. Plus*. – 2019. – Vol. 134, No. 4. – P. 144.
14. **Gau C., Wu S.X., Su H.S.** Synchronization of Vortex Shedding and Heat Transfer Enhancement Over a Heated Cylinder Oscillating With Small Amplitude in Streamwise Direction // *Journal of Heat Transfer*. – 2001. – Vol. 123, No. 6. – P. 1139–1148.
15. **Laminar** convective heat transfer from a circular cylinder exposed to a low frequency zero-mean velocity oscillating flow / H. Iwai, T. Mambo, K. Nakabe, K. Suzuki // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2004. – Vol. 47, No. 21. – P. 4659–4672.
16. **Experimental** investigation on heat transfer characteristics of staggered tube bundle heat exchanger immersed in oscillating flow / Z. Wu, Sh. You, H. Zhang, W. Zheng // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2020. – Vol. 148. – P. 119125.
17. **Heat transfer of a tube bundle in a pulsating flow** / V.M. Molochnikov, A.N. Mikheev, A.K. Aslaev et al. // *Thermophys. Aeromech.* – 2019. – Vol. 26, No. 4. – P. 547–559.
18. **Flow** structure between the tubes and heat transfer of a tube bundle in pulsating flow / V.M. Molochnikov, A.N. Mikheev, A.K. Aslaev, et al. // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2018. – Vol. 1105. – P. 012024.
19. **Mulcahey T.J., Pathak M.G., Ghiaasiaan S.M.** The effect of flow pulsation on drag and heat transfer in an array of heated square cylinders // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2013. – Vol. 64. – P. 105–120.
20. **Dellali E.** Pressure drop analysis of oscillating flows through a miniature porous regenerator under isothermal and nonisothermal conditions // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2019. – Vol. 103. – P. 394–405.
21. **Leong K.C., Jin L.W.** An experimental study of heat transfer in oscillating flow through a channel filled with an aluminum foam // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2005. – Vol. 48, No. 2. – P. 243–253.
22. **Leong K.C., Jin L.W.** Effect of oscillatory frequency on heat transfer in metal foam heat sinks of various pore densities // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2006. – Vol. 49, No. 3–4. – P. 671–681.
23. **Thermal** and hydraulic efficiency of the corridor tube bundle in conditions of pulsating flow of fluid / V.K. Ilyin, A.I. Haibullina, A.R. Hayrullin, L.S. Sabitov // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* – 2017. – Vol. 240. – P. 012025.
24. **Хайбуллина А.И., Хайруллин А.Р.** Численное исследование теплообмена в коридорном пучке труб в условиях пульсирующего потока жидкости // *Вестник ИГЭУ*. – 2019. – Вып. 4. – С. 12–21.
25. **Moffat R.J.** Describing the uncertainties in experimental results // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 1988. – Vol. 1, No. 1. – P. 3–17.
26. **Investigation** of low-frequency-oscillating water flow in metal foam with 10 pores per inch / Ö. Bağcı, A. Arbak, M. De Paepe, N. Dukhan // *Heat Mass Transfer*. – 2018. – Vol. 54, No. 8. – P. 2343–2349.
27. **Leong K.C., Jin L.W.** Characteristics of oscillating flow through a channel filled with open-cell metal foam // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2006. – Vol. 27, No. 1. – P. 144–153.
28. **Heat Transfer in 3D Laguerre–Voronoi Open-Cell Foams under Pulsating Flow** / A. Hayrullin, A. Haibullina, A. Sinyavin, et al. // *Energies*. – 2022. – Vol. 15, No. 22. – P. 8660.

## References

1. Weaver, D.S. A review of cross-flow induced vibrations in heat exchanger tube array. *J. Fluids Struct.*, 1988, vol. 2, pp. 73–93.
2. Zhang, N., Li, D., Gao, B., Ni, D., Li, Z. Unsteady Pressure Pulsations in Pumps – A Review. *Energies*, 2022, vol. 16, no. 1, p. 150.
3. Ibrahim, K.A., Luk, P., Luo, Z. Cooling of Concentrated Photovoltaic Cells – A Review and the Perspective of Pulsating Flow Cooling. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 6, p. 2842.
4. Zukauskas, A. Heat Transfer from Tubes in Crossflow. *Adv. Heat Transf.*, 1972, vol. 18, pp. 87–159.
5. Nguyen, Q.D., Lei, C. A PIV study of blockage ratio effects on flow over a confined circular cylinder at low Reynolds numbers. *Exp Fluids*, 2023, vol. 64, no. 1, p. 10.
6. Hemmat Esfe, M., Bahiraei, M., Torabi, A., Valadkhani, M. A critical review on pulsating flow in conventional fluids and nanofluids: Thermo-hydraulic characteristics. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 120, p. 104859.

7. Ye, Q., Zhang, Y., Wei, J. A comprehensive review of pulsating flow on heat transfer enhancement. *Applied Thermal Engineering*, 2021, vol. 196, p. 117275.
8. Qamar, A., Seda, R., Bull, J.L. Pulsatile flow past an oscillating cylinder. *Physics of Fluids*, 2011, vol. 23, no. 4, p. 041903.
9. Andraka, C.E., Diller, T.E. Heat-Transfer Distribution Around a Cylinder in Pulsating Crossflow. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1985, vol. 107, no. 4, pp. 976–982.
10. Saxena, A., Ng, E.Y.K. Steady and Pulsating Flow Past a Heated Rectangular Cylinder(s) in a Channel. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2018, vol. 32, no. 2, pp. 401–413.
11. Martin, E., Velazquez, A., Valeije, A. Heat transfer downstream of a 3D confined square cylinder under flow pulsation. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2018, vol. 74, no. 12, pp. 1747–1769.
12. Molochnikov, V.M., Mikheev, N.I., Mikheev, A.N., Paereliy, A.A. Heat transfer from a cylinder in pulsating cross-flow. *Thermophys. Aeromech*, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 569–575.
13. Srivastava, A., Dhiman, A. Pulsatile flow and heat transfer of shear-thinning power-law fluids over a confined semi-circular cylinder. *Eur. Phys. J. Plus*, 2019, vol. 134, no. 4, p. 144.
14. Gau, C., Wu, S.X., Su, H.S. Synchronization of Vortex Shedding and Heat Transfer Enhancement Over a Heated Cylinder Oscillating With Small Amplitude in Streamwise Direction. *Journal of Heat Transfer*, 2001, vol. 123, no. 6, pp. 1139–1148.
15. Iwai, H., Mambo, T., Nakabe, K., Suzuki, K. Laminar convective heat transfer from a circular cylinder exposed to a low frequency zero-mean velocity oscillating flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, vol. 47, no. 21, pp. 4659–4672.
16. Wu, Z., You, Sh., Zhang, H., Zheng, W. Experimental investigation on heat transfer characteristics of staggered tube bundle heat exchanger immersed in oscillating flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 148, p. 119125.
17. Molochnikov, V.M., Mikheev, A.N., Aslaev, A.K., Goltsman, A.E., Paereliy, A.A. Heat transfer of a tube bundle in a pulsating flow. *Thermophys. Aeromech*, 2019, vol. 26, no. 4, pp. 547–559.
18. Molochnikov, V.M., Mikheev, A.N., Aslaev, A.K., Goltsman, A.E., Paereliy, A.A. Flow structure between the tubes and heat transfer of a tube bundle in pulsating flow. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2018, vol. 1105, p. 012024.
19. Mulcahey, T.I., Pathak, M.G., Ghiaasiaan, S.M. The effect of flow pulsation on drag and heat transfer in an array of heated square cylinders. *International Journal of Thermal Sciences*, 2013, vol. 64, pp. 105–120.
20. Dellali, E. Pressure drop analysis of oscillating flows through a miniature porous regenerator under isothermal and nonisothermal conditions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, vol. 103, pp. 394–405.
21. Leong, K.C., Jin, L.W. An experimental study of heat transfer in oscillating flow through a channel filled with an aluminum foam. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, vol. 48, no. 2, pp. 243–253.
22. Leong, K.C., Jin, L.W. Effect of oscillatory frequency on heat transfer in metal foam heat sinks of various pore densities. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, vol. 49, no. 3–4, pp. 671–681.
23. Ilyin, V.K., Haibullina, A.I., Hayrullin, A.R., Sabitov, L.S. Thermal and hydraulic efficiency of the corridor tube bundle in conditions of pulsating flow of fluid. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2017, vol. 240, p. 012025.
24. Khaybullina, A.I., Khayrullin, A.R. Chislennoe issledovanie teploobmena v koridornom puchke trub v usloviyakh pul'siruyushchego potoka zhidkosti [A numerical study of heat transfer in the in-line tube bundle under pulsating fluid flow conditions]. *Vestnik IGÉU*, 2019, issue 4, pp. 12–21.
25. Moffat, R.J. Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1988, vol. 1, no. 1, p. 3–17.
26. Bağcı, Ö., Arbak, A., De Paepe, M., Dukhan, N. Investigation of low-frequency-oscillating water flow in metal foam with 10 pores per inch. *Heat Mass Transfer*, 2018, vol. 54, no. 8, pp. 2343–2349.
27. Leong, K.C., Jin, L.W. Characteristics of oscillating flow through a channel filled with open-cell metal foam. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2006, vol. 27, no. 1, pp. 144–153.
28. Hayrullin, A., Haibullina, A., Sinyavin, A., Balzamorov, D., Ilyin, V., Khairullina, L., Bronskaya, V. Heat Transfer in 3D Laguerre–Voronoi Open-Cell Foams under Pulsating Flow. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 22, p. 8660.