

УДК 621.574

## Экспериментальное исследование и моделирование системы охлаждения микропроцессора на базе холодильной машины

А. И. АНДРЕЕВ\*, канд. техн. наук А. Е. СЕМЕНОВ  
Астраханский государственный технический университет  
\*E-mail: aresut79@mail.ru

*В данной работе исследуются вопросы эффективности работы системы микропроцессор-система жидкостного охлаждения — холодильная машина и поддержания оптимальной температуры электронных компонентов. Для этого проведены эксперименты на системе охлаждения микропроцессора с встроенной холодильной машиной (мини-чиллер), содержащей мини-компрессор и микроканальные теплообменники. Проведен эксперимент с контролем всех основных параметров холодильной машины и микропроцессора. На основании полученных данных построена математическая модель, описывающая изменение мощности системы охлаждения и параметров работы холодильной машины и позволяющая рассчитывать температуры и расходы теплоносителя, а также получать наиболее эффективные режимы для работы системы охлаждения. Получены данные для коэффициентов теплопередачи в микроканальном конденсаторе и испарителе при работе холодильной машины. Построена математическая модель холодильной машины. Получены экспериментальные данные в ходе работы холодильной установки в системе охлаждения микропроцессора. Построена математическая модель системы охлаждения на базе холодильной машины. Построенные математические модели позволяют проектировать и моделировать систему охлаждения для процессоров с высокой вычислительной мощностью и высоким тепловыделением. Использование холодильной машины имеет высокую перспективность, так как даже при малых размерах холодильной машины, она имеет высокую холодопроизводительность в сравнение со стандартными системами жидкостного охлаждения. Так, при максимальном тепловом потоке от процессора около 150–200 Вт, холодильная установка, в данном исследовании, имеет холодопроизводительность около 220 Вт при температуре кипения около 10 °С и температуре конденсации 40 °С, что позволяет рекомендовать водяные системы охлаждения со встроенными холодильными машинами для высокопроизводительных компьютеров и небольших рабочих станций.*

**Ключевые слова:** микропроцессор, холодильная машина, микроканальный теплообменник, система жидкостного охлаждения, математическая модель, теплоотдача, теплопередача, потребляемая мощность.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 12.01.2025, одобрена после рецензирования 11.03.2025, принята к печати 28.03.2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-3-11-21

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Андреев А. И., Семенов А. Е. Экспериментальное исследование и моделирование системы охлаждения микропроцессора на базе холодильной машины // Вестник Международной академии холода. 2025. № 3. С. 11–21.  
DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-3-11-21

## Experimental study and modeling of a microprocessor cooling system based on a refrigerating machine

A. I. ANDREEV\*, Ph. D. A. E. SEMENOV

Astrakhan State Technical University

\*E-mail: aresut79@mail.ru

*This paper examines the efficiency for microprocessor-liquid cooling system-refrigerating machine system and maintaining the optimal temperature of electronic components. For the purpose, experiments were conducted on the microprocessor cooling system with a built-in refrigerating machine (mini-chiller) containing a mini-compressor and microchannel heat exchangers. An experiment was conducted with control of all the main parameters of the refrigerating machine and microprocessor. Based on the obtained data, a mathematical model was built describing the change in the cooling system power and the operating parameters of the refrigerating machine and allows calculating the temperatures and flow rates of the coolant, as well as obtaining the most efficient modes for the cooling system. Data were obtained for the heat transfer coefficients in the microchannel condenser and evaporator during operation of the refrigerating machine. A mathematical model of the refrigerating machine was built. Experimental data were obtained during the operation of the refrigeration*

*unit in the microprocessor cooling system. A mathematical model of the cooling system based on the refrigerating machine was built. The mathematical models allow designing and simulating a cooling system for processors with high computing power and high heat generation. The use of a refrigerating machine has high prospects, since even with small dimensions of the refrigerating machine it has a high cooling capacity compared to standard liquid cooling systems. Thus, with a maximum heat flow from the processor of about 150–200 W, the refrigeration unit, in this study, has a cooling capacity of about 220 W at a boiling temperature of about 10 °C and a condensation temperature of 40 °C, which allows us to recommend water cooling systems with built-in refrigerating machines for high-performance computers and small workstations.*

**Keywords:** microprocessor, refrigerating machine, microchannel heat exchanger, liquid cooling system, mathematical model, heat transfer, heat transmission, power consumption.

#### Article info:

Received 12/01/2025, approved after reviewing 13/03/2025, accepted 28/03/2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-3-11-21

Article in Russian

#### For citation:

Andreev A. I., Semenov A. E. Experimental study and modeling of a microprocessor cooling system based on a refrigerating machine. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2025. No 3. p. 11-21. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-3-11-21

## Введение

Развитие элементов электроники и появление новых подходов к формированию микропроцессорной техники, заключающихся в повышении количества элементов на подложке, и как следствие, уменьшение техпроцесса, вплоть до 10 нм, приводит к возникновению задач повышения мощности охлаждения.

Для высокопроизводительных компьютерных систем часто применяют жидкостное охлаждение процессора водой или сходных по параметрам теплоносителей [1]–[5].

В работе [6]–[9] показан средний возможный расход теплоносителя (дистиллированной воды) и нагрузка на процессор (до 120 Вт). Однако процессоры последних лет имеют среднее тепловыделение в режиме максимальной нагрузки более 200 Вт, что требует особых подходов к увеличению эффективности жидкостных систем. Одним из таких подходов является использование холодильной машины в составе системы жидкостного охлаждения.

Применение холодильной машины для охлаждения процессора персонального компьютера на хладагенте R600a показано в [10], в которой были использованы микроканальные теплообменники (испаритель и конденсатор), и система была способна отводить тепловые нагрузки до 50 Вт. Холодильный коэффициент 2,25 был получен для температур кипения 50 °C и конденсации 90 °C. В исследовании [11] предложили миниатюрную систему охлаждения для охлаждения центрального процессора, которая была способна воспринимать тепловые нагрузки до 180 Вт и поддерживать температуру процессора на уровне всего 10 °C, и, более того, охлаждать сразу несколько процессоров. В ранее приведённых исследованиях [12]–[13] использовали испарители с кипящим хладагентом, установленные на процессоре. Экспериментальные данные продемонстрировали хорошую производительность системы охлаждения, однако было отмечено, что при использовании метода охлаждения холодильным агентом существует неравномерность охлаждения, поскольку часть теплообменной поверхности испарителя содержит пары хладагента, имеющие низкую охлаждающую способность. Также в работе [14] испытывали собственную миниатюрную систему на базе холо-

дильной машины для системы охлаждения с испарителем, установленным на крышке процессора. Работа была сосредоточена на количестве подаваемого хладагента и длине капиллярной трубки, что позволило создать конструкцию для достижения холодопроизводительности 200 Вт для охлаждения процессора.

В публикации [15] авторы рассмотрели гибридный теплообменник из двух полостей, с двухфазным охлаждением, сосредоточенным в центральной области и теплоносителем — наножидкостью  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /вода, охлаждающей периферийную область теплообменника. Они показали, что охлаждающая способность теплоносителя в 270 Вт может быть увеличена до 540 Вт с помощью гибридной охлаждающей поверхности.

Roachaiyaroorn и др. [16] провели исследование миниатюрной системы охлаждения на базе холодильной машины с использованием хладагента R134a и микроканального теплообменника, что показало перспективность использования охлаждения холодильной машиной.

Применение и адаптация холодильной машины компрессионного типа в составе жидкостной системы охлаждения микроэлектроники является перспективной задачей. Во-первых, это обеспечивает необходимую холодопроизводительность, во-вторых, теплоноситель обеспечивает необходимую инерционность позволяя гасить колебания температуры процессора.

Исследование системы жидкостного охлаждения, оснащенной компрессионной холодильной машиной в составе системы охлаждения микропроцессора требует особого подхода, заключающегося в вопросах совместной работы и синхронизации элементов системы. В данной работе показаны результаты исследования взаимодействия минихолодильной машины на базе новых компрессоров и микроканальных теплообменников с микропроцессорами Intel i7 core 13700k архитектуры Raptor Lake и Intel i9 core 14900k, архитектуры Raptor Lake-S [17, 18].

## Материалы и методы

В качестве холодильной машины применен чиллер на базе миникомпрессора ротационного типа ST19DC12H с частотой вращения 3500 об/мин и рабочим объемом 1,9 куб. см/об, в качестве хладагента применен R134a

(тетрафторэтан —  $\text{CH}_2\text{FCF}_3$ ), а в качестве теплоносителя дистиллированная вода. Испарителя холодильной машины — пластинчатый минитеплообменник FSC003G-8-4.5-H. Конденсатор — микроканальный алюминиевый теплообменник. За основу взята система — Thermaltake Floe RC 240 в которую входит микроканальный теплообменник процессора.

Экспериментальная схема системы жидкостного охлаждения процессора с холодильной машиной показана на рис. 1.

Эксперименты проводились в два этапа. На первом этапе проводились исследования холодильной машины при изменении параметров теплоносителя. На втором этапе исследовалась работа системы охлаждения при работе микропроцессора в стресс режиме с контролем по программе AIDA64. Для поддержания температуры теплоносителя в систему стенда вводился нагреватель при тепловом потоке от процессора меньшим, чем холодопроизводительность холодильной установки. Для измерения оборотов вентиляторов использовался лазерный тахометр — DT-2234с+. Потребляемая мощность измерялась с помощью ваттметра — Robiton PM-1.

Помимо этого, в данном исследовании измерялись гидродинамические сопротивления теплообменников, для измерения разности давлений применялся дифференциальный микроманометр-1890.

Для измерения температуры в ходе экспериментов были изготовлены и установлены термопары типа Т (медь-константан). В качестве реперных точки были приняты: температура кипения воды (дистиллированная, технология — 2 ступенчатый осмос), тройная точка воды, тройная точка галлия (марка Гл-0), точность термопар —  $0,1^\circ\text{C}$ . Также была применена термобатарея с 8 спаями для измерения разности температур с точностью  $0,1^\circ\text{C}$ . Тарировка проводилась с помощью образцового платинового термометра сопротивления, сосуда Дьюара и дистиллированной воды. Расход теплоносителя изменялся с помощью байпасной линии насоса с иглычатым вентилем. Изменение производительности нагревателя осуществлялось с помощью автотрансформатора — TDGC2. Измерение температуры внутри корпуса компьютера осуществлялось с помощью тепловизора — Testo 875-2i

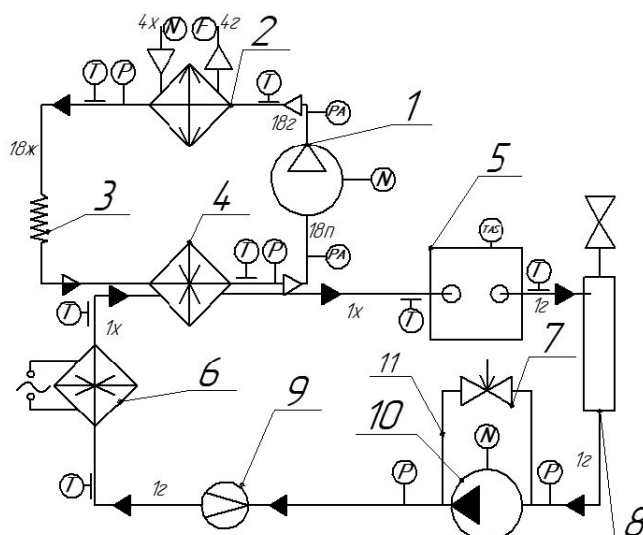


Рис. 1. Схема экспериментальной системы охлаждения процессора с холодильной машиной: 1 — компрессор; 2 — конденсатор; 3 — капиллярная трубка; 4 — испаритель; 5 — микроканальный теплообменник; 6 — электронагреватель; 7 — регулирующий вентиль; 8 — ресивер; 9 — ротаметр; 10 — насос; 11 — байпасная линия

Fig. 1. Experimental processor cooling system with a refrigerating machine: 1 — compressor; 2 — condenser; 3 — capillary tube; 4 — evaporator; 5 — microchannel heat exchanger; 6 — electric heater; 7 — control valve; 8 — receiver; 9 — rotameter; 10 — pump; 11 — bypass line

с программным обеспечением Testo IR-Soft. Для отвода теплоты от процессора использовался микроканальный теплообменник из системы охлаждения — Floe RC 240. В ходе работы большое внимание уделялось точности измерения геометрических факторов теплообменной поверхности микроканального теплообменника. На рис. 2 показано оребрение теплообменника и расположение ребер на теплопередающей поверхности.

Геометрические характеристики теплообменника, полученные в ходе измерения и расчета приведены в табл. 1.

На первом этапе теплоноситель при постоянном расходе циркулировал через испаритель холодильной

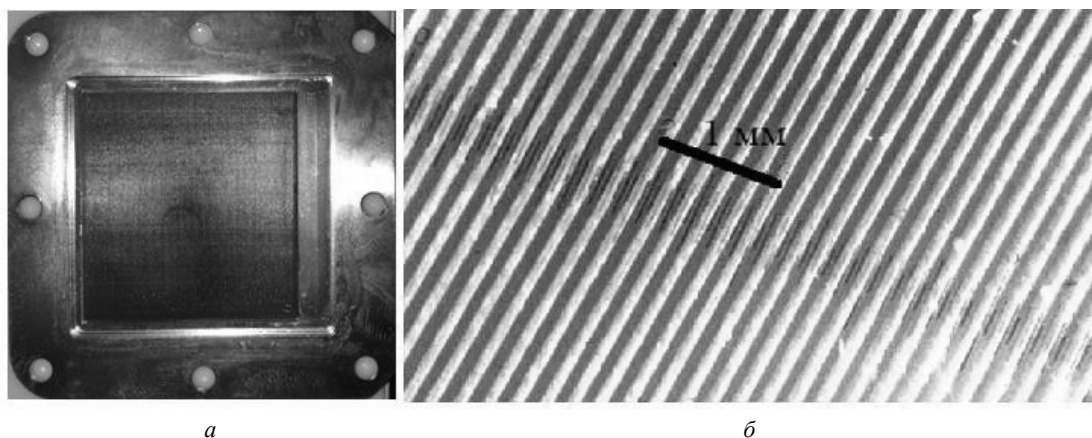


Рис. 2. Микроканальный теплообменник: а — расположение ребер на теплопередающей поверхности; б — оребренная поверхность под микроскопом

Fig. 2. Microchannel heat exchanger: а — arrangement of fins on the heat transfer surface; б — finned surface under microscope

Таблица 1  
Характеристика микроканального теплообменника

Table 1  
Characteristics of a microchannel heat exchanger

| Наименование параметра                                               | Значение              |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Сторона теплообменника по длине ребра, м                             | 0,03                  |
| Сторона теплообменника поперек ребер, м                              | 0,033                 |
| Высота теплообменника, м                                             | 0,011                 |
| Длина ребра, м                                                       | 0,03                  |
| Высота ребра, м                                                      | 0,0018                |
| Толщина ребра, м                                                     | 0,000114              |
| Шаг ребер, м                                                         | 0,000229              |
| Зазор между ребрами, м                                               | 0,000114              |
| Число ребер                                                          | 132                   |
| Поверхность теплообменника, прилегающая к процессору, м <sup>2</sup> | $9,9 \cdot 10^{-4}$   |
| Сечение теплообменника поперек хода воды, м <sup>2</sup>             | $5,4 \cdot 10^{-5}$   |
| Проходное сечение, м <sup>2</sup>                                    | $3,584 \cdot 10^{-5}$ |
| Поверхность ребра, м <sup>2</sup>                                    | $5,94 \cdot 10^{-5}$  |
| Степень оребрения                                                    | 7,92                  |
| Гидравлический диаметр теплообменника с учетом ребер, м              | $4,42 \cdot 10^{-4}$  |

машины, нагрев осуществлялся с помощью термостата — UTU-4. Холодильная машина работала в установленном режиме. При этом был проведен ряд опытов с различными нагрузками, расходами и температурами теплоносителя. Параметры снимались в стационарном режиме работы.

На втором этапе холодильная машина работала при включении процессора на максимальную производительность с максимальным тепловым потоком от процессора. При этом постоянно температуры теплоносителя устанавливалось с помощью электронагревателя.

Полученные на обоих этапах эксперимента данные обрабатывались и анализировались.

### Экспериментальное исследование параметров холодильной машины и построение математической модели холодильной машины

Холодильная машина работала в установленном режиме, при этом снимались температуры в различных точках фреонового контура, прежде всего, температуры конденсации и кипения, перегрева и переохлаждения.

На рис. 3 показаны зависимости холодильного коэффициента холодильной машины от расхода и температуры теплоносителя на входе в испаритель.

Повышение холодильного коэффициента связано с повышением температуры кипения, что сказывается на параметрах работы компрессора холодильной установки.

Повышение расхода или температуры теплоносителя приводит к повышению теплового потока к хладагенту, что приводит к повышению температуры кипения и существенно сказывается на работе компрессора, в частности потребляемой мощности и холодопроизводительности. Характеристики компрессора в зависимости от температуры кипения и конденсации представлены на рис. 4.

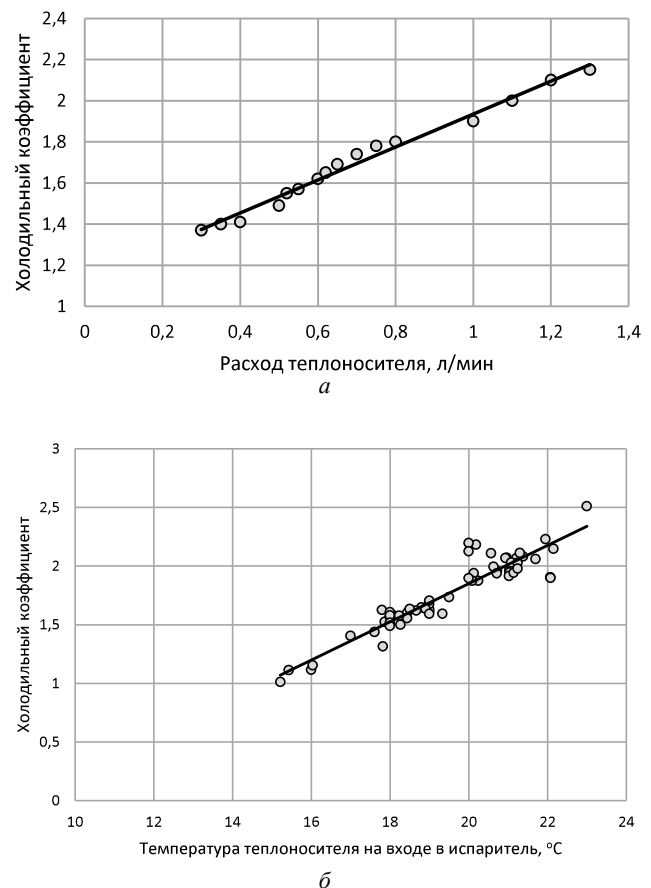


Рис. 3. Зависимость холодильного коэффициента от расхода (а) и температуры теплоносителя на входе в испаритель (б)

Fig. 3. Dependence of the refrigeration coefficient on flow rate (a) and temperature of the coolant at the evaporator inlet (b)

Мощность трансформатора (адаптера) введена, чтобы учесть потерю мощности в трансформаторе при преобразовании и потому потребляемая мощность системы охлаждения выше расчетной, что важно учитывать при конструировании системы охлаждения. Потеря мощности в адаптере — Piton Power IP67 зависит от потребляемой мощности составляет для компрессора 23%.

На основании экспериментальных данных и разработанной программы на базе Mathcad была построена математическая модель холодопроизводительности холодильного коэффициента и потребляемой мощности компрессора.

$$\begin{aligned}
 Q_0(T_0, T_k) &= -7 \cdot 10^{-2} T_0 T_k - 6,75 \cdot 10^{-3} T_k^2 - 92,1 \cdot 10^{-3} T_k + \\
 &+ 191,62 + 8,98 T_0 + 13 \cdot 10^2 T_0^2; \\
 N_k(T_0, T_k) &= 6 \cdot 10^{-2} T_0 T_k - 2,75 \cdot 10^{-3} T_k^2 + \\
 &+ 2,25 T_k - 2,5 - 2,18 T_0 - 4,9 \cdot 10^{-2} T_0^2; \\
 \varepsilon(T_0, T_k) &= 1,12 \cdot 10^{-2} T_0 T_k + 5,34 \cdot 10^{-3} T_k^2 - 0,51 T_k + \\
 &+ 13,26 + 0,53 T_0 + 7,58 \cdot 10^{-3} T_0^2,
 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $T_0, T_k$  — температура кипения и конденсации, °C.

Помимо этого, полученные данные позволяют построить зависимость коэффициента теплопередачи в конденсаторе, на интервале достоверности температур 25–70 °C (рис. 5).

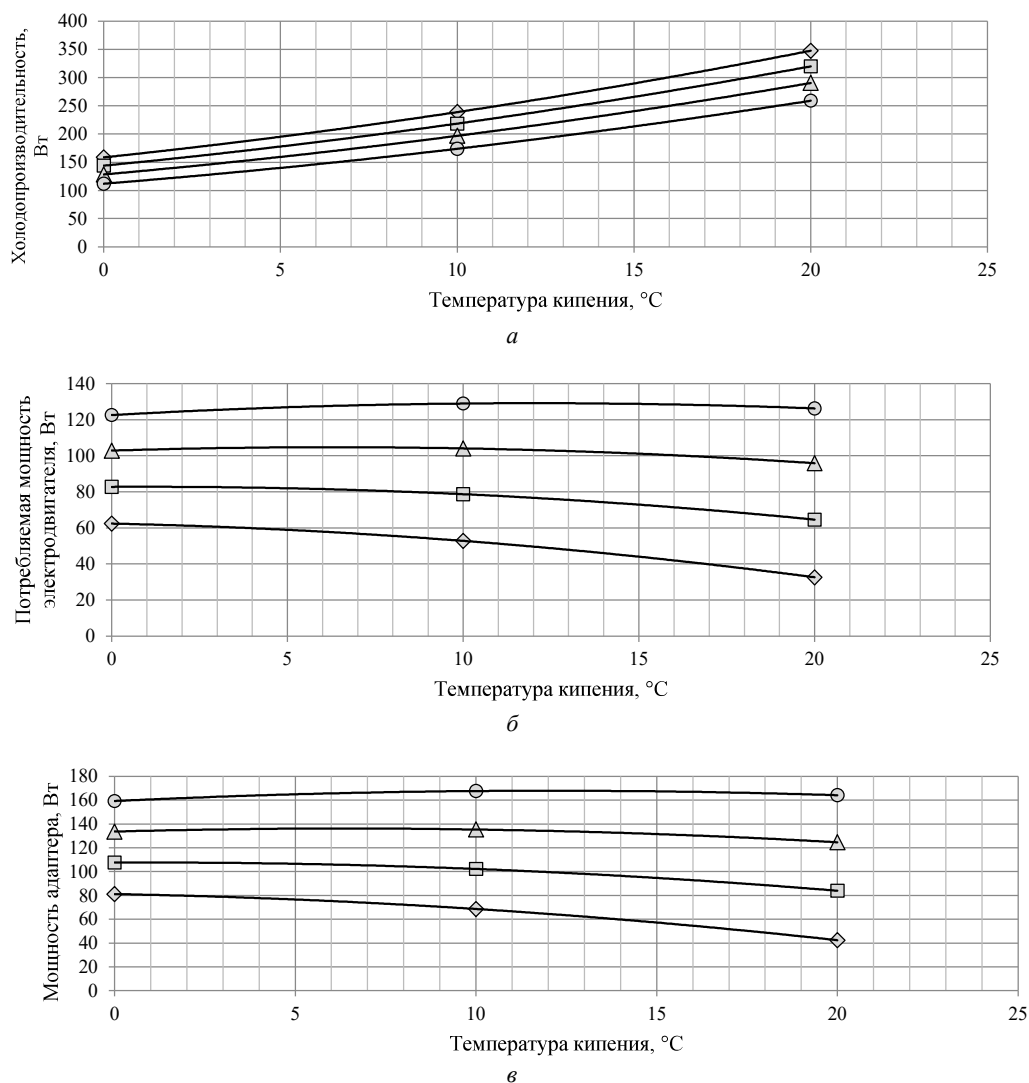


Рис. 4. Параметры работы компрессора и адаптера от температуры кипения и конденсации: а — холодопроизводительность, б — потребляемая мощность, в — мощность трансформатора, при температурах конденсации:  $\diamond$  — 30 °C;  $\square$  — 40 °C;  $\Delta$  — 50 °C;  $\circ$  — 60 °C

Fig. 4. Compressor and adapter operating parameters depending on boiling and condensation temperatures: а — cooling capacity, б — power consumption, в — transformer power, at condensation temperatures:  $\diamond$  — 30 °C;  $\square$  — 40 °C;  $\Delta$  — 50 °C;  $\circ$  — 60 °C

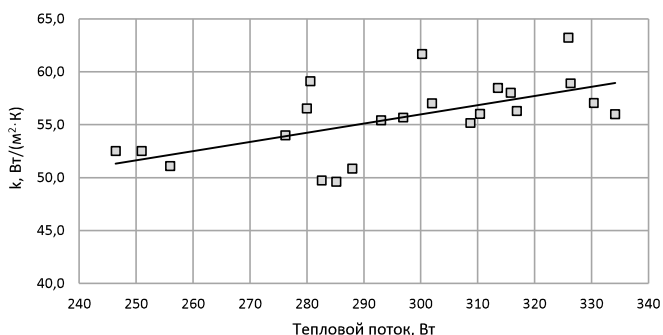


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопередачи конденсатора от теплового потока ( $\square$  — экспериментальные данные; — — данные модели)

Fig. 5. Dependence of the condenser heat transfer coefficient on heat flux ( $\square$  — experimental data, — — model data)

Коэффициент теплоотдачи к воздуху от микроканального конденсатора с гофрированным оребрением зависит от скорости воздуха и может быть получен из уравнения.

$$\alpha = 38,698 \cdot v^{0,29}, \quad (2)$$

где  $v$  — скорость воздуха в главном сечении конденсатора, м/с.

Зависимость аэродинамического сопротивления конденсатора от скорости воздуха может быть записана, исходя из значений скорости воздуха через главное (фронтальное) сечение теплообменника:

$$\Delta P_{\text{аэро}} = 0,2944v^2 + 6,3113v - 0,2901 \quad (3)$$

Квадратичное отклонение составляет 0,9681.

Такой же результат получен и для испарителя (рис. 6), представлявшего собой пластинчатый теплообменный аппарат с шириной канала 1,27 мм.

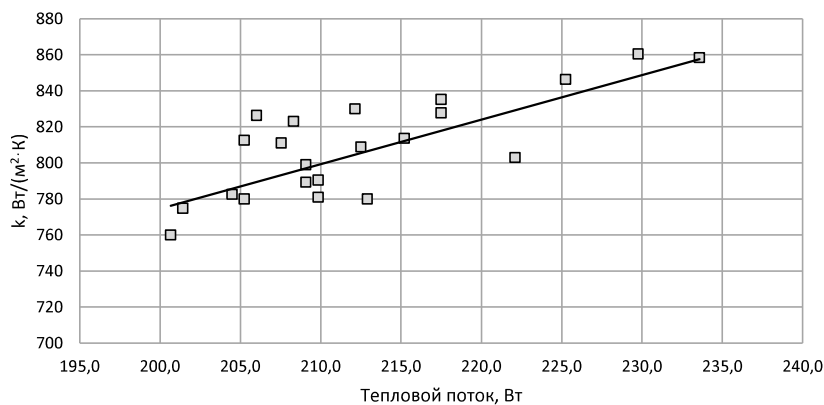


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплопередачи испарителя от теплового потока  
(□ — экспериментальные данные; — — данные модели)

Fig. 6. Dependence of the evaporator heat transfer coefficient on the heat flux (□ — experimental data, — — model data)

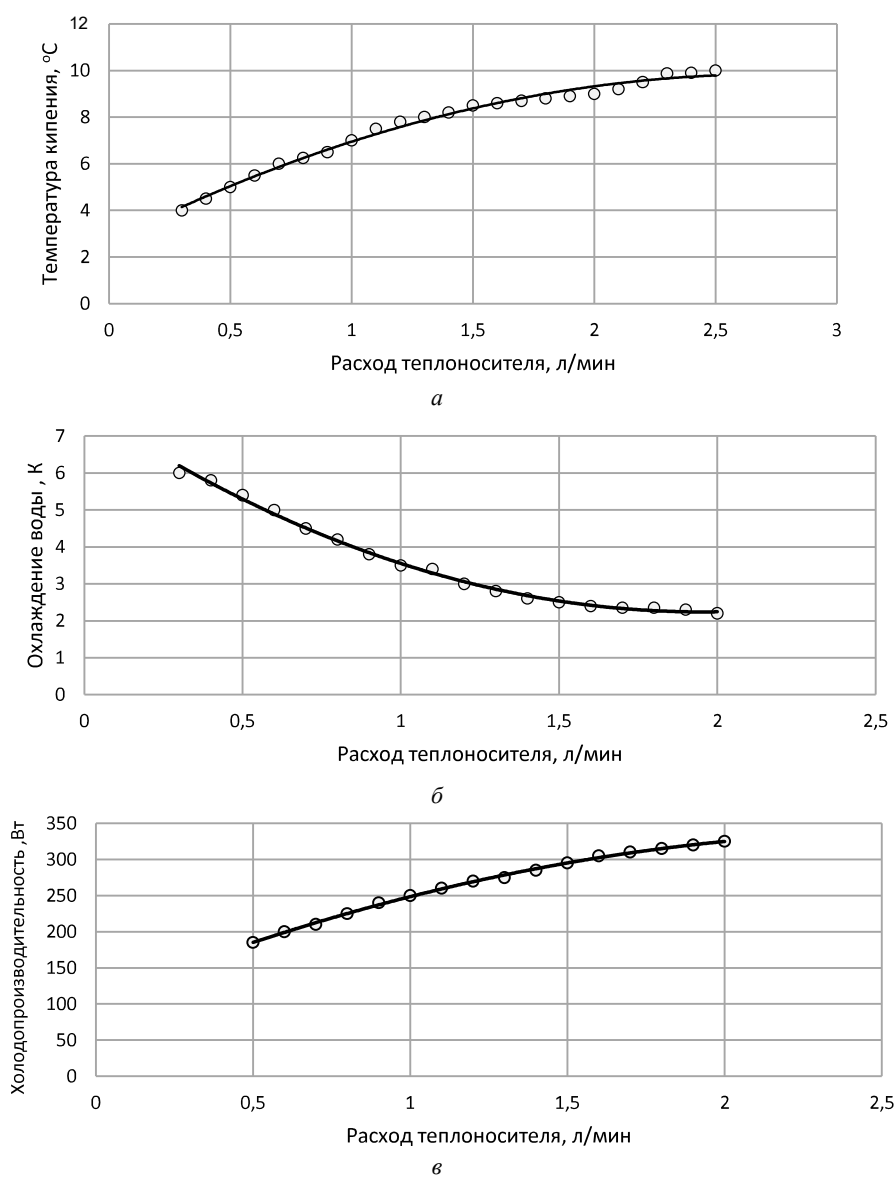


Рис. 7. Результаты испытаний и моделирование системы охлаждения с ХМ: а — зависимость температуры кипения от расхода воды; б — зависимость холодопроизводительности ХМ системы охлаждения от расхода воды; в — зависимость охлаждения воды от расхода воды, при температуре теплоносителя 14–15 °С

Fig. 7. Test results and simulation of the cooling system with refrigerating machine: a — dependence of boiling temperature on water flow rate; b — dependence of cooling capacity of the refrigerating machine cooling system on water flow rate; c — dependence of water cooling on water flow rate at a coolant temperature of 14–15 °C

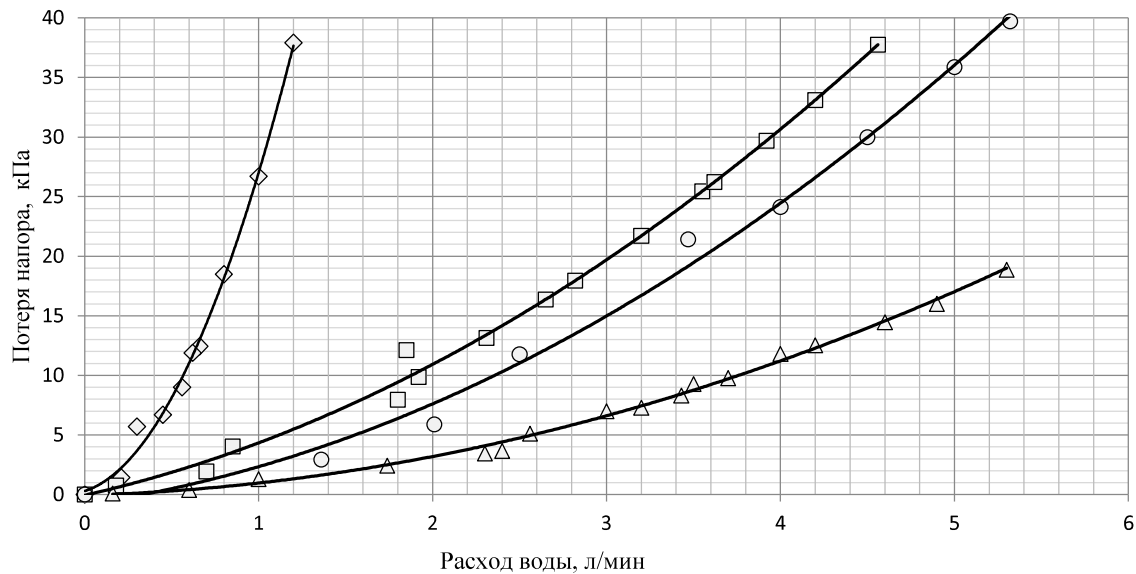


Рис. 8. Результаты исследования потерь напора в жидкостном теплообменнике (♦), воздушном теплообменнике (□), испарителе (Δ), на погонный метр трубы системы охлаждения, диаметром 8 мм (○)

Fig. 8. Results of the study of pressure losses in a liquid heat exchanger (♦), air heat exchanger (□), evaporator (Δ), per meter of cooling system pipe with a diameter of 8 mm (○)

Полученные данные показывают, что с ростом температуры кипения и понижением температуры конденсации улучшается энергоэффективность холодильной установки.

Математическая модель холодильной машины, в составе системы охлаждения микропроцессора

В ходе эксперимента были получены данные системы охлаждения, приведенные на рис. 7.

На рис. 8 показаны экспериментальные зависимости потерь напора в жидкостном теплообменнике, воздушном теплообменнике и испарителе холодильной машины от расхода теплоносителя, а также потери на движение теплоносителя в трубопроводах системы охлаждения.

Повышение гидросопротивлений в теплообменных аппаратах приводит к увеличению необходимой мощности насоса для обеспечения требуемого расхода теплоносителя. Из-за высокой степени оребрения и применения микроканальных теплообменников их сопротивление высоко, и вопросы интенсификации теплообмена и применения более мощных насосов требуют решения задачи оптимизации с точки зрения сохранения энергоэффективности системы охлаждения. Возрастание сопротивления системы приводит к возрастанию потребной мощности насоса.

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{сист}} = \Delta P_{\text{т.о.}} + \Delta P_{\text{исп}} + \Delta P_{\text{рад}} + \Delta P_{\text{труб}}; \\ N_{\text{нас}} = K_{\text{п.м.}} \cdot \frac{\Delta P_{\text{сист}} V_T}{1000 \eta}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $V_T$  — расход теплоносителя м<sup>3</sup>/с,  $\Delta P_{\text{сист}}$  — общие потери напора в системе, Па,  $\Delta P_{\text{исп}}$  — потеря напора теплоносителя в испарителе холодильной машины, Па,  $\Delta P_{\text{труб}}$  — потеря напора теплоносителя в трубопроводе, Па,  $\Delta P_{\text{т.о.}}$  — потеря напора в жидкостном теплообменнике, Па,  $\Delta P_{\text{рад}}$  — потеря напора в воздушном теплообменнике, Па,  $K_{\text{п.м.}}$  — коэффициент, учитывающий повышение мощности для регулировки производительности системы охлаждения,  $\eta$  — КПД насоса.

Полученные данные показывают, что, при охлаждении малых объемов теплоносителя, расход, температура охлаждаемой жидкости, температура кипения и конденсации сильно влияют на изменение режима работы холодильной установки.

В качестве целевой функций для данного этапа исследования принята потребляемая мощность системы охлаждения.

$$N_{\text{потреб}} = f(N_{\text{проц}}, V_T, T_T), \quad (5)$$

где  $V_T$  — расход теплоносителя, л/мин;  $N_{\text{проц}}$  — мощность процессора, Вт;  $N_{\text{потреб}}$  — потребляемая мощность процессора и системы охлаждения, Вт;  $T_T$  — температура теплоносителя, °C.

Область значений переменных в моделируемом процессе:

$$50 < N_{\text{пр}} < 180 \text{ Вт}; 5 < T_{\text{н. вых}} < 30 \text{ °C};$$

$$0,3 < V_T < 2,0 \text{ л/мин}; 15 < T_{\text{окр. сред}} < 35 \text{ °C}.$$

Общий вид модели, после подставленных в решение уравнений данных из эксперимента, принимает полиномиальный вид.

$$T_{\text{проц}} = 36,128 + 1,203T + 6,026V_T;$$

$$N_{\text{проц}} = 103,118 + 0,567T;$$

$$\begin{aligned} N_{\text{потреб}} = & 1,34 \cdot 10^{-3} T_{\text{проц}}^2 T_{\text{нар.в}}^2 - 0,168 V T_{\text{нар.в}}^2 - 2,03 \cdot 10^{-3} T_{\text{нар.в}}^3 + \\ & + 0,22 \cdot 10^{-3} T_{\text{нар.в}}^2 - 0,048 T_{\text{проц}} T_{\text{нар.в}} V + 1,88 V^2 T_{\text{нар.в}} + 8,48 V T_{\text{нар.в}} - \\ & - 6,91 T_{\text{нар.в}} - 0,104 T_{\text{нар.в}} T_{\text{нар.в}} + 7,56 \cdot 10^{-4} T_{\text{проц}}^2 T_{\text{нар.в}} + 3,1 T_{\text{проц}} V^2 - \\ & - 21,69 V^3 - 133,61 V^2 + 67,37 V - 1,99 T_{\text{проц}} V - 0,035 T_{\text{проц}}^2 V + \\ & + 1,552 \cdot 10^{-3} - 71,89 T_{\text{проц}} + 1,29 T_{\text{проц}}^2 - 7,44 T_{\text{проц}}^3, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $T_{\text{нар.в}}$  — температура наружного воздуха вблизи системы, °C.

Модель потребляемой мощности системой охлаждения может быть представлена в более простой степенной форме

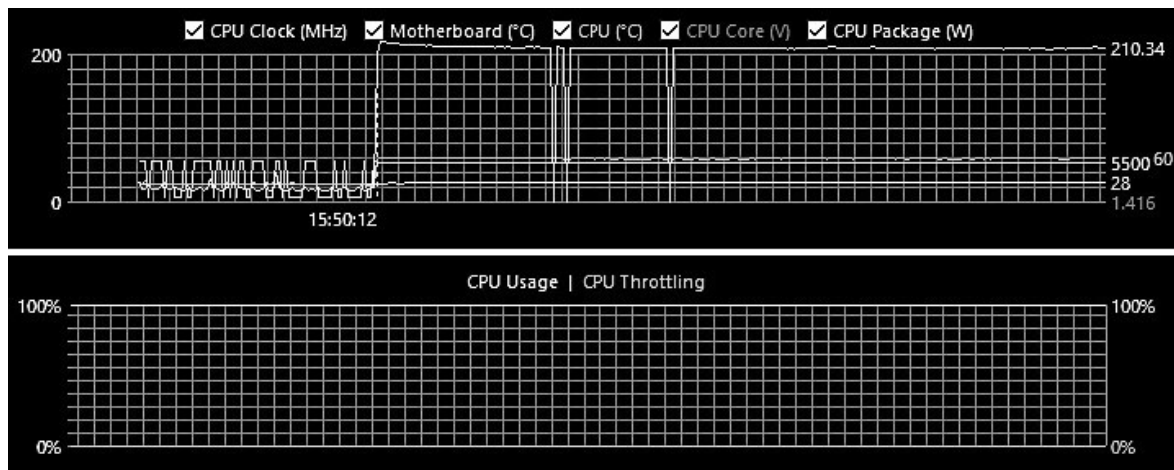


Рис. 9. Параметры работы электронных компонентов микропроцессора Intel core i9 14900k при максимальной производительности и охлаждении холодильной машиной

Fig. 9. Operating parameters for the electronic components of the Intel Core i9 14900k microprocessor at maximum performance and cooling by a refrigerating machine

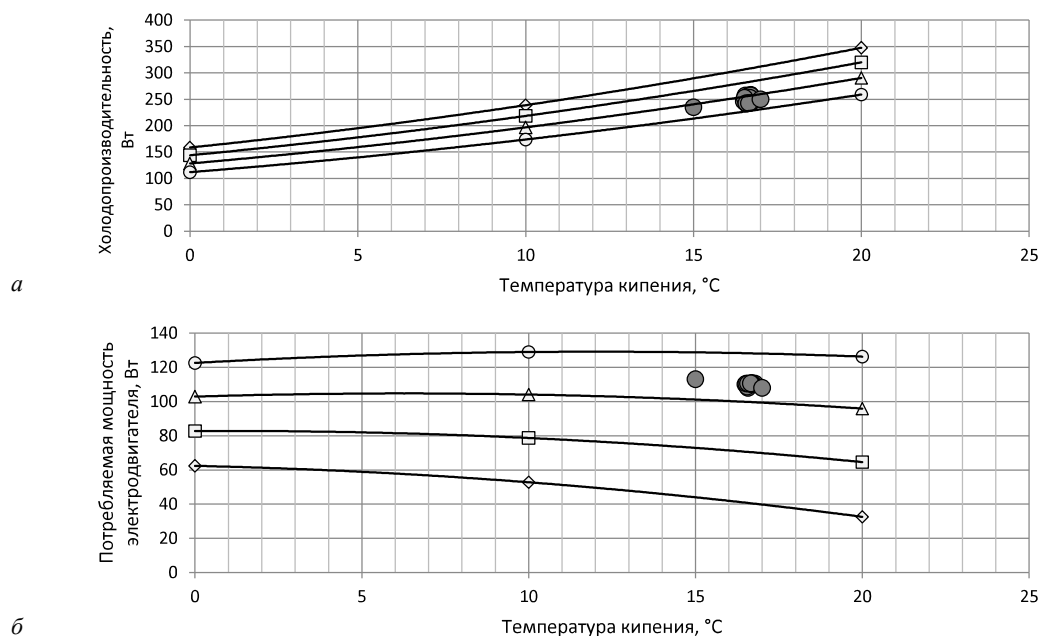


Рис. 10. Расчетные параметры работы компрессора: а — холодопроизводительность; б — потребляемая мощность при температурах конденсации:  $\diamond$  — 30 °C;  $\square$  — 40 °C;  $\Delta$  — 50 °C;  $\circ$  — 60 °C,  $\bullet$  — параметр работы холодильной машины в составе рабочей станции при температуре конденсации  $\approx$  50 °C

Fig. 10. Design compressor operating parameters: a — cooling capacity; b — power consumption at condensation temperatures:  $\diamond$  — 30 °C;  $\square$  — 40 °C;  $\Delta$  — 50 °C;  $\circ$  — 60 °C,  $\bullet$  — operating parameter of the refrigerating machine as part of the workstation at a condensation temperature of  $\approx$  50 °C

$$N_{\text{потреб}} = 3923,34 T_{\text{проц}}^{-1,015} V_T^{-0,175} T_{\text{нар.в}}^{0,109}, \quad (7)$$

в которой отклонение от расчетных данных составило 6,8%.

В результате проведенного анализа установлено, что в системе охлаждения наибольшее влияние на температуру процессора оказывает температура теплоносителя на выходе из испарителя и расход теплоносителя.

Применительно к системе охлаждения процессора необходимо отметить, что использование холодильной машины имеет очень высокую перспективность, так как

даже при малых размерах холодильной машины, она имеет высокую холодопроизводительность в сравнение со стандартными системами жидкостного охлаждения и элементами Пельтье [19].

#### Проверка результатов исследования при работе системы охлаждения с холодильной машиной на процессоре с более высокой производительностью

Для проверки результатов моделирования и конструирования была собрана рабочая станция с более высокой

производительностью, на базе процессора Intel core i9 14900k. Для подачи хладоносителя установлен центробежный насос — Thermaltake Pacific PR22-D5, для отвода теплоты использован микроканальный теплообменник — Corsair Hydro X. Рабочая станция смонтирована в корпусе — Thermaltake The Tower 900. Параметры работы микропроцессора в стресс-режиме при охлаждении холодильной машиной показаны на рис. 9, где пунктирной вертикальной линией показан момент запуска стресс-режима (выход на максимальную производительность).

Изменения мощности и температуры, включая переходные режимы хорошо согласуются с ранее полученными данными.

В рабочей станции использована та же холодильная машина, что и в экспериментальном стенде. Параметры работы холодильной машины при работе в составе рабочей станции также согласуются с математической моделью, представленной в формулах (8)–(11). Температура кипения была на уровне 15–17 °С, температура конденсации 49–53 °С. Температура теплоносителя составляла — 21 °С. Параметры работы холодильной машины в составе рабочей станции в сопоставлении с моделью представлены на рис. 10.

Из рис. 10 видно, что полученные данные холодопроизводительности и потребляемой мощности хорошо согласуются с полученной моделью, максимальное от-

клонение 10,3%, что позволяет говорить о достоверности модели. Результаты испытаний позволяют говорить о высокой перспективности включения компрессионных холодильных машин в состав высокопроизводительных рабочих станций и серверов.

### Заключение

Применение холодильной машины в составе жидкостной системы охлаждения позволяет существенно понизить рабочую температуру процессора, от 60 до 30 °С в режиме его максимальной производительности. Малые габариты холодильной машины при применении микроканальных теплообменников позволяет разработать и эксплуатировать чиллер, располагаемый внутри корпуса системного блока, что позволяет использовать чиллеры для персональных компьютеров, малых серверов и рабочих станций. Построенные математические модели позволяют проектировать и моделировать систему охлаждения для процессоров с высокой вычислительной мощностью и высоким тепловыделением. Достоверность модели была проверена при работе холодильной машины в составе рабочей станции. Для повышения эффективности система охлаждения также может оборудоваться дополнительным оборудованием — аккумуляторами холода, в том числе, и для крупных комплексов и систем [20].

### Литература

1. Новиков А. А. Разработка системы жидкостного охлаждения центрального процессора персонального компьютера // Всероссийская научно-техническая конференция студентов Студенческая научная весна 2015: Машиностроительные технологии, С. 1–2.
2. Страшко Е. И., Шамаров М. В., Жлобо Р. А. Методика охлаждения центрального процессора // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2024. Т. 51. № 1. С. 22–30. DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-1-22-30
3. Siricharoenpanich A. et al. Thermal management system of CPU cooling with a novel short heat pipe cooling system // Case Studies in Thermal Engineering. 2019. vol. 15. p. 100545. DOI: 10.1016/j.csite.2019.100545
4. Harun M. A. et al. A review on development of liquid cooling system for central processing unit (CPU) // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. 2021. vol. 78. no 2. p. 98–113.
5. Яновский А. А., Каныгин Я. В. Математическое моделирование и разработка систем охлаждения процессоров персональных компьютеров // Международный студенческий научный вестник. 2015. №. 3–4. С. 496–498.
6. Воовин А. В., Асташин Н. А. Жидкостное охлаждение процессора персонального компьютера // Современные тенденции развития науки и технологий. 2017. № 1–1. С. 31–35.
7. Исаев А. И., Киселев И. Г., Филатов В. В. Эффективные способы охлаждения силовых полупроводниковых приборов. Л.: Энергоиздат, 1982. 136 с.
8. Щелконогов А. Е., Пичугов В. Д., Мосина Е. В. Прогрессивные технологии охлаждения микропроцессорных систем на основе применения дистиллированной воды // Научные исследования: теория, методика и практика. 2017. С. 99–101.

### References

1. Novikov A. A. Development of a liquid cooling system for the central processor of a personal computer / All-Russian scientific and technical conference of students Student Scientific Spring 2015: Mechanical Engineering Technologies, pp. 1–2. (in Russian)
2. Strashko E. I., Shamarov M. V., Zhlobo R. A. Methodology for cooling the central processor. *Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical sciences*. 2024. V. 51. No. 1. P. 22–30. DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-1-22-30 (in Russian)
3. Siricharoenpanich A. et al. Thermal management system of CPU cooling with a novel short heat pipe cooling system. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019. Vol. 15. P. 100545. DOI: 10.1016/j.csite.2019.100545
4. Harun M. A. et al. A review on development of liquid cooling system for central processing unit (CPU). *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2021. Vol. 78. No. 2. P. 98–113.
5. Yanovsky A. A., Kanygin Ya. V. Mathematical modeling and development of cooling systems for personal computer processors. *International Student Scientific Bulletin*. 2015. No. 3–4. P. 496–498. (in Russian)
6. Vdovin A. V., Astashin N. A. Liquid cooling of a personal computer processor. *Modern trends in the development of science and technology*. 2017. No. 1–1. P. 31–35. (in Russian)
7. Isakeev A. I., Kiselev I. G., Filatov V. V. Effective methods of cooling power semiconductor devices. L.: Energoizdat, 1982. 136 p. (in Russian)
8. Shchelkonogov A. E., Pichugov V. D., Mosina E. V. Progressive technologies for cooling microprocessor systems based on the use of distilled water. *Scientific research: theory, methodology and practice*. 2017. P. 99–101. (in Russian)

9. Ганьжа Д. Интервью с Алексеем Шмелевым // Журнал сетевых решений. 2013. № 9. С. 10–13.
10. Mongia R. et al. Small scale refrigeration system for electronics cooling within a notebook computer // Thermal and Thermomechanical Proceedings 10th Intersociety Conference on Phenomena in Electronics Systems, 2006. ITherm 2006. IEEE, 2006. p. 751–758. DOI: 10.1109/ITHERM. 2006.1645421
11. Rao W., Zhou Y. X., Liu J., Deng Z. S., Ma K. Q., Xiang S. H. Vapor-compression-refrigerator enabled thermal management of high performance computer. In: 22nd International Congress of Refrigeration, Paper No. ICR07-B2-1026, Beijing, August 21–27. 2007.
12. Shannon M. A., Phillpott M. L., Miller N. R., Bullard C. W., Beebe D. J., Jacobi A. M., Hrnjak P. S., Saif T., Aluru N., Sehitoglu H., Rockett A., Economy J. Integrated mesoscopic cooler circuits (IMCCS). In: International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, Proc. ASME-AES vol. 39, Nashville, TN, November 15–20. pp. 75–82. <https://doi.org/10.1115/IMECE1999-0812>
13. Thome J. R., Dupont V., Jacobi A. M. Heat transfer model for evaporation in microchannels. Part I: presentation of the model. // Int. J. Heat Mass Tran. 2004. 47, 3375–3385. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer. 2004.01.006
14. Kandlikar S. G., Garimella S., Li D., Colin S., King M. R. Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels. Elsevier, Amsterdam. 2006.
15. Naduvilakath-Mohammed F. M. et al. An experimental investigation of vapor compression refrigeration cooling and energy performance for CPU thermal management // Case Studies in Thermal Engineering. 2024. vol. 54 (1). p. 103963. DOI: 10.1016/j. csite. 2023.103963
16. Poachaiyapoom A. et al. Miniature vapor compression refrigeration system for electronics cooling // Case Studies in Thermal Engineering. 2019. vol. 13. p. 100365. DOI: 10.1016/j. csite. 2018.100365
17. Diakun O., Dobrosolski J., Czarnul P. Investigation of Performance and Energy Consumption of Tokenization Algorithms on Multi-core CPUs Under Power Capping // International Conference on Computer Information Systems and Industrial Management. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. p. 332–346.
18. Ozturk E., Tari I. Forced air cooling of CPUs with heat sinks: A numerical study // IEEE transactions on components and packaging technologies. 2008. vol. 31. no 3. p. 650–660. DOI: 10.1109/TCAPT. 2008.2001840
19. Андреев А. И., Семенов А. Е., Минофьев Р. Р., Рыков А. А. Охлаждение центрального процессора с использованием термоэлектрического элемента // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященная Дню радио. 2024. № 1 (79). С. 316–319.
20. Семенов А. Е., Андреев А. И. Оптимизации режимов работы судовой холодильной установки с аккумулятором искусственного холода. // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2023. № 3. С. 65–73. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-3-65-73
9. Ganja D. Interview with Alexey Shmelev. *Journal of network solutions*. 2013. No. 9. P. 10–13. (in Russian)
10. Mongia R. et al. Small scale refrigeration system for electronics cooling within a notebook computer. *Thermal and Thermomechanical Proceedings 10th Intersociety Conference on Phenomena in Electronics Systems*, 2006. ITherm 2006. IEEE, 2006. pp. 751–758. DOI: 10.1109/ITHERM. 2006.1645421
11. Rao W., Zhou Y. X., Liu J., Deng Z. S., Ma K. Q., Xiang S. H., Vapor-compression-refrigerator enabled thermal management of high performance computer. In: *22nd International Congress of Refrigeration*, Paper No. ICR07-B2-1026, Beijing, August 21–27. 2007.
12. Shannon, M. A., Phillpott, M. L., Miller, N. R., Bullard, C. W., Beebe, D. J., Jacobi, A. M., Hrnjak, P. S., Saif, T., Aluru, N., Sehitoglu, H., Rockett, A., Economy, J. Integrated mesoscopic cooler circuits (IMCCS). In: *International Mechanical Engineering Congress and Exhibition*, Proc. ASME-AES vol. 39, Nashville, TN, November 15–20. 1999. pp. 75–82. <https://doi.org/10.1115/IMECE1999-0812>
13. Thome J. R., Dupont V., Jacobi A. M., Heat transfer model for evaporation in microchannels. Part I: presentation of the model. *Int. J. Heat Mass Tran.* 2004. 47, 3375–3385. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer. 2004.01.006
14. Kandlikar S. G., Garimella S., Li D., Colin S., King M. R. Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels. Elsevier, Amsterdam. 2006.
15. Naduvilakath-Mohammed F. M. et al. An experimental investigation of vapor compression refrigeration cooling and energy performance for CPU thermal management. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024. vol. 54 (1). P. 103963. DOI: 10.1016/j. csite. 2023.103963
16. Poachaiyapoom A. et al. Miniature vapor compression refrigeration system for electronics cooling. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019. vol. 13. P. 100365. DOI: 10.1016/j. csite. 2018.100365
17. Diakun O., Dobrosolski J., Czarnul P. Investigation of Performance and Energy Consumption of Tokenization Algorithms on Multi-core CPUs Under Power Capping. *International Conference on Computer Information Systems and Industrial Management*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. pp. 332–346.
18. Ozturk E., Tari I. Forced air cooling of CPUs with heat sinks: A numerical study. *IEEE transactions on components and packaging technologies*. 2008. vol. 31. No. 3. p. 650–660. DOI: 10.1109/TCAPT. 2008.2001840
19. Andreev A. I., Semenov A. E., Minofiev R. R., Rykov A. A. Cooling of the central processor using a thermoelectric element. *Scientific and technical conference of the St. Petersburg Scientific and Technical Association of the Russian Electronic Networks named after A. S. Popov*, dedicated to the Radio Day. 2024. No. 1 (79). P. 316–319. (in Russian)
20. Semenov A. E., Andreev A. I. Optimization of the operating modes of a marine refrigeration unit with an artificial cold accumulator. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology*. 2023. No. 3. P. 65–73. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-3-65-73 (in Russian)

**Сведения об авторах****Андреев Александр Иванович**

Ассистент, аспирант кафедры  
«Теплоэнергетика и холодильные машины»,  
Астраханский государственный технический университет,  
Россия, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, aresut79@mail.ru.  
ORCID 0000-0003-4064-9835

**Семенов Александр Евгеньевич**

К. т. н., доцент кафедры «Теплоэнергетика и холодильные  
машины», Астраханский государственный технический  
университет, Россия, г. Астрахань, ул. Татищева, 16,  
semenalex48@yandex.ru.  
ORCID 0000-0002-2513-9389

**Information about authors****Andreev Alexander I.**

Assistant, graduate student of the Department  
of Thermal Power Engineering and Refrigerating Machines,  
Astrakhan State Technical University, Russia, Astrakhan,  
Tatishcheva St., 16, aresut79@mail.ru.  
ORCID 0000-0003-4064-9835

**Semenov Alexander E.**

Ph. D., Associate Professor of the Department  
of Thermal Power Engineering and Refrigerating Machines,  
Astrakhan State Technical University, Russia, Astrakhan,  
Tatishcheva St., 16, semenalex48@yandex.ru.  
ORCID 0000-0002-2513-9389



Статья доступна по лицензии

Creative Commons «Attribution-NonCommercial»



**Образовательный центр**  
**«Энергоэффективные инженерные системы»**  
**Университета ИТМО**

Приглашает принять участие в  
XII Международной научно-технической конференции

**«Искусственный холод в XXI веке»**

посвященной 95-летию основания Ленинградского института холодильной промышленности

**19-21 ноября 2025 г.**

VIII Международной научно-технической конференции

**«Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ»**

посвященной 95-летию со дня рождения проф. Платунова Е.С.

**27-28 ноября 2025 г.**

**Основные научные направления конференций:**

- «Искусственный холод в XXI веке»
  - промышленный холод и энергоэффективные низкотемпературные системы;
  - криогенная техника, водородные технологии и технологии СПГ;
  - системы кондиционирования и жизнеобеспечения;
  - пищевые системы и консервирование холодом;
- экономическая и экологическая эффективность предприятий.
- «Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ»
  - состояние теплофизических измерений в области низких и умеренных температур (методы и приборы);
  - результаты исследований теплофизических свойств;
  - вопросы автоматизации теплофизических измерений;
  - состояние метрологии теплофизических измерений.

Формат проведения конференции – очно-дистанционный.

Регистрация участников – до 1 октября 2025 г.

По итогам конференции будет издан Сборник тезисов конференции, индексируемый в РИНЦ.

**Информация о конференциях и регистрация на сайтах:**

«Искусственный холод в XXI веке»: <https://rft21.itmo.ru>

«Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ»:  
<https://iarspb.tilda.ws/modernmethodsandmeansofresearchofthermophysicalpropertiesofsubstances>