

УДК: 556.332.629

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-2-106-116

ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ СУПЕРКОМПЬЮТЕРОВ МГУ (НА ПРИМЕРЕ СУПЕРКОМПЬЮТЕРА «ЛОМОНОСОВ»)

Олег Александрович Глумов¹✉, Александр Владилинович Расторгуев²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; glum-oleg@yandex.ru ✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; alvr9@mail.ru

Аннотация. Подземные водоносные горизонты могут быть хорошим аккумулятором как тепла, так и холода. Пример системы охлаждения суперкомпьютера с использованием подземных вод был успешно реализован в Австралийском научном центре Pawsey. Предпринята попытка оценить возможности использования подземных вод для системы охлаждения суперкомпьютера «Ломоносов» мощностью 2,8 МВт с целью удовлетворения его потребностей в эффективном летнем охлаждении в связи с недостаточно стабильной работой имеющихся систем воздушного охлаждения. Приведены результаты эксперимента по закачиванию нагретой воды в трещиноватый известняк. На основе интерпретации эксперимента выбрана гетерогенно-блоковая модель теплопереноса (двойная пористость) и определены ее параметры. Создан численно-аналитический программный код для интерпретации полевых данных эксперимента. Моделируется несколько сценариев проектирования системы охлаждения. Результаты моделирования показали, что непрерывная работа проектируемой системы с использованием известнякового водоносного горизонта обеспечит максимальную потребность в охлаждении суперкомпьютера мощностью 2,8 МВт в течение 10 лет, при этом необходимый интервал работы в летний период составляет 1 месяц.

Ключевые слова: охлаждение подземными водами; моделирование теплопереноса

Для цитирования: Глумов О.А., Расторгуев А.В. Использование подземных вод для охлаждения суперкомпьютеров МГУ (на примере суперкомпьютера «Ломоносов» // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 2. С. 106–116.

USING GROUNDWATER FOR COOLING MOSCOW STATE UNIVERSITY SUPERCOMPUTERS (FOR EXAMPLE, THE «LOMONOSOV» SUPERCOMPUTER)

O.A. Glumov¹, A.V. Rastorguev²

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; glum-oleg@yandex.ru ✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; alvr9@mail.ru

Abstract. Aquifers may represent suitable storage systems for both heat and cold. An example of a supercomputer cooling system using groundwater has been successfully implemented at the Australian Science Center Pawsey. The authors tried to evaluate the possibilities of groundwater use for the cooling system of the “Lomonosov” supercomputer with a capacity of 2.8 MW to meet its needs for efficient summer cooling due to the insufficiently stable performance of the available air-cooling systems. The article gives the results of the experiment on pumping the heated water into fractured limestone. Based on the experiment interpretation, the authors chose the model (double porosity) of heat transport and determined its parameters. The authors created a numerical-analytical program code for the interpretation of the field data of the experiment. They modeled several scenarios for the design of the cooling system. The simulation results showed that the continuous operation of the projected system using the limestone aquifer would provide the maximum need for cooling a 2.8 MW supercomputer within 10 years, while the required operation interval in the summer period is 1 month.

Keywords: groundwater cooling; heat transfer modeling

For citation: Glumov O.A., Rastorguev A.V. Using groundwater for cooling Moscow State University supercomputers (for example, the «Lomonosov» supercomputer). *Moscow University Geol. Bull.* 2023; 2: 106–116. (In Russ.).

Введение. В связи с проблемой нехватки ресурсов и стремлением к модернизации и оптимизации систем кондиционирования растет интерес к системам, использующим водоносные горизонты в качестве рабочего тела, несущего в себе энергию, для отопления и охлаждения. Для этого проводятся исследования и прогнозы влияния подобных систем на окружающую среду и предлагаются различные

решения, позволяющие увеличить коэффициент полезного действия установки. Особенно активно в этих исследованиях участвуют США, Бельгия, Австралия и Китай [Sheldon et al., 2015; Possemiers, 2014; Wildemeersch, 2014; Feng, 2015; Stuart et al., 2013; Sarbu, 2014; Zhou, 2016; Atam, 2016]. В нашей стране использование таких систем не так развито в связи с наличием больших запасов природного газа, однако

исследования в области низкопотенциального тепла подземных вод проводились еще в 1985 г. [Алексеев и др., 1985]. Рассматриваемая нами система подразумевает использование подземных вод в качестве источника охлаждения.

Так, использование водоносных горизонтов для охлаждения систем кондиционирования применяется в научном центре Поуси (Pawsey), расположенном в Перте, Австралия. В 2014 г. проектировщики провели исследование, которое включало моделирование двух сценариев. Первый предполагал наличие двух скважин, одна из которых откачивала воду с температурой 21 °С из песчаного водоносного горизонта Мулало, а вторая возвращала нагретую воду с температурой 31 °С обратно в горизонт. Вторым сценарий подразумевал наличие трех скважин. Третья скважина играла роль гидравлического барьера и была расположена между откачивающей и закачивающей скважинами. Она нагнетала воду с естественной температурой 21 °С и тем самым защищала откачивающую скважину от поступления нагретой воды, что в противном случае приводило бы к уменьшению коэффициента полезного действия охладительной установки.

Основываясь на этом опыте, предлагаем использовать подобное решение для более эффективного охлаждения суперкомпьютера «Ломоносов».

Характеристики объекта исследований. Суперкомпьютер «Ломоносов», установленный в МГУ университете в 2009 г., относится к уникальным системам высшего диапазона производительности. Он содержит 6654 вычислительных узла, более 94 000 процессорных ядер, обладает пиковой производительностью 1,37 Пфлоп/с, потребляя не более 2,8 МВт электроэнергии.

В настоящее время осуществляется воздушное охлаждение суперкомпьютера, однако стоит принять во внимание, что используемое решение теряет эффективность в летние месяцы из-за увеличения температуры уличного воздуха и наличия пуха, который забивает очистные фильтры и приводит к более быстрому износу оборудования.

Основные данные, характеризующие тепловыделение суперкомпьютера «Ломоносов», представлены в табл. 1.

Таблица 1

Данные тепловыделения суперкомпьютера «Ломоносов»

Теплозатраты	2,8 МВт
Температура на выходе	25 °С
Требуемый расход Q	160 м³/ч

Расчет необходимого расхода откачки и закачки воды производился по следующей формуле:

$$Q = \frac{H}{\Delta T c_w}, \tag{1}$$

где H — теплозатраты, ΔT — разность температуры налива и температуры среды (15 °С), c_w — теплоемкость воды (4,180 Дж/л/К).

Гидрогеологические условия. Потенциально в районе МГУ такие расходы воды могут быть получены из хорошо проницаемых каменноугольных водоносных комплексов. Здесь рассматриваются перспективы использования средне и нижнекарбонных водоносных комплексов в качестве источника воды для охлаждения. Возможности использования каменноугольных водоносных горизонтов оценивались ранее в 1980 годы при проектировании варианта охлаждения технологического оборудования Института Биоорганической химии (ИБХ) им. М.М. Шемякина. Тогда для обоснования проекта был пробурен куст скважин, состоящий из одной откачивающей скважины, одной закачивающей и одной наблюдательной. Проведен трассерный опыт в известняках среднего карбона. В качестве трассера были использованы радиоактивные изотопы [Расторгуев, 2012]. Полученное в результате низкое значение активной пористости, $n = 0,005$ свидетельствовало о наличии выдержанных трещин, по которым можно ожидать быстрое распространения тепла. Схема куста с разрезом, близким к гидрогеологическим условиям в районе территории МГУ, приведена на рис 1. Результаты бурения показывают, что карбоновые водоносные горизонты отделены от залегающих выше мезокайнозойских юрскими глинами, которые имеют мощность более 20 м и не только минимизируют водообмен, но и являются теплоизолятором. Это позволяет рассматривать карбоновые водоносные комплексы как изолированную от поверхности систему [Осипова, Медведева, 1997].

Среднекаменноугольные отложения представлены подольско-мячковским (C2pd-mč) и каширским (C2kš) водоносными комплексами, разделенными ростиславскими глинами (C2rst). В районе работ отмечается взаимосвязь этих комплексов вследствие фациального выклинивания глин. Водовмещающими породами комплексов служат известняки и доломиты — кремнистые, крепкие, трещиноватые, с прослоями глин и мергелей. Общая мощность этих отложений — 87,0–94,0 м, мощность подольско-мячковского водоносного комплекса — 40,0–64,0 м, мощность каширского водоносного комплекса — около 38,0 м. Как следует из рис. 1 при бурении средний карбон, представленный карбонатными отложениями, не был разделен на подольско-мячковскую и каширскую толщи. По региональным данным подольско-мячковский водоносный комплекс в районе МГУ характеризуется градиентом потока подземных вод равным 0,005. Фоновое значение температуры на глубине кровли подольско-мячковского комплекса — 7,7 °С. Температурный режим подольско-мячковского водоносного комплекса в районе проведения эксперимента — нарушенный. В 1986 г. температура подземных вод на глубине

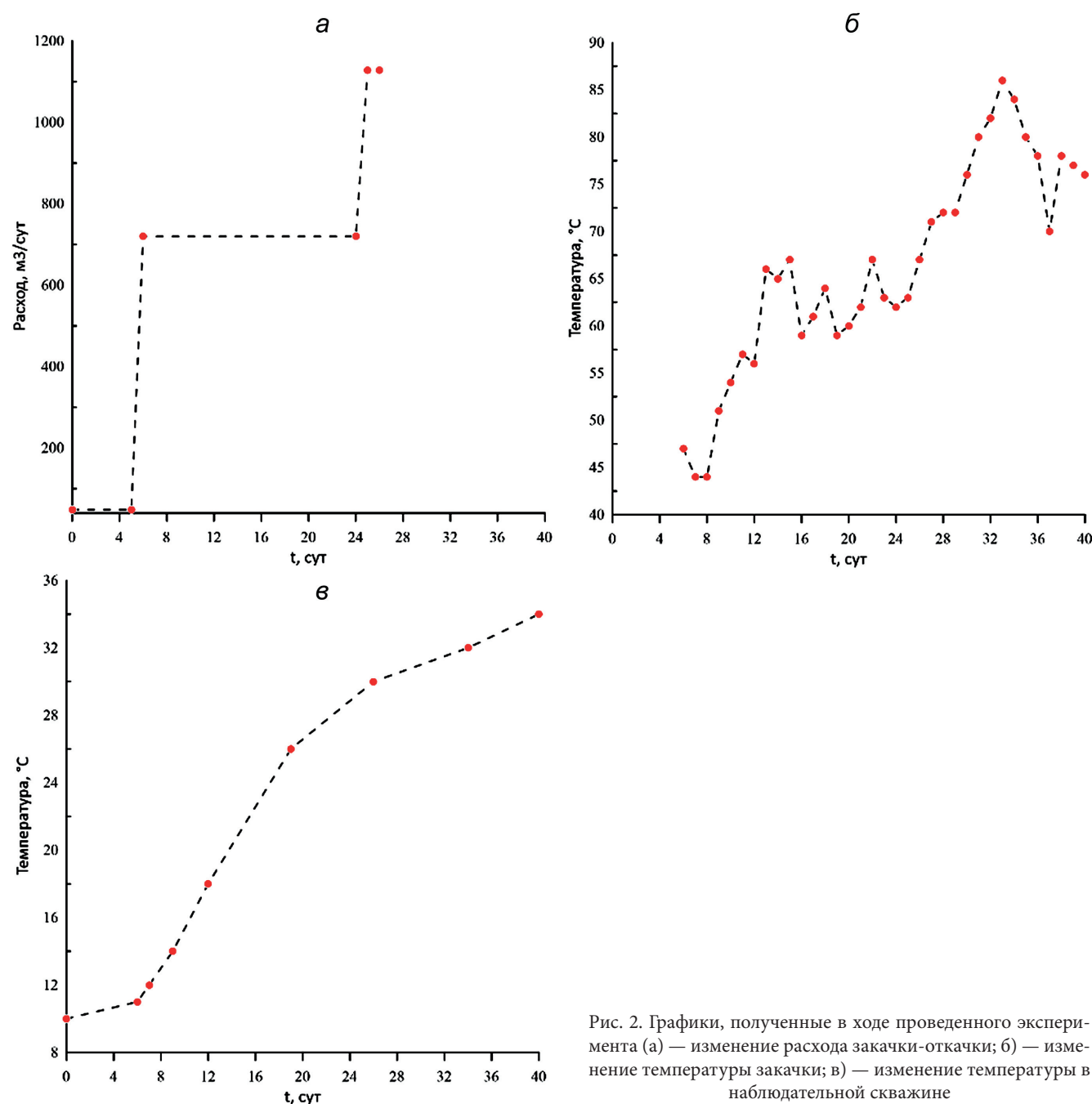


Рис. 2. Графики, полученные в ходе проведенного эксперимента (а) — изменение расхода закачки-откачки; б) — изменение температуры закачки; в) — изменение температуры в наблюдательной скважине

Мироненко, Румынин, 1986]. Расчеты для модели теплопроводности проводились для теплоемкости пласта $c_{\Pi} = 500$ ккал/м³/град и теплопроводности пласта $\lambda_{\Pi} = 84$ ккал/м/град/сут. Расчеты для схемы Ловерье проводились для той же теплоемкости пласта, а теплопроводности и теплоемкости пород кровли и подошвы равных $\lambda_k = 48$ ккал/м/град/сут и $c_k = 250$ ккал/м³/град соответственно.

При проведении аналитических расчетов была принята средняя температура воды для скважины закачки $T_c = 58$ °C. На графиках (см. рис. 3) дано сопоставление относительных температур $T^* = (T - T_0)/(T - T_c)$, полученных на основе трех моделей, с данными в наблюдательной скважине через 21 сутки после начала эксперимента. Здесь T — температура воды в наблюдательной скважине,

T_0 — температура пластовой воды равная 10,6 °C. Наилучшее совпадение теплового фронта, по сравнению с двумя другими моделями, было получено для гетерогенно-блоковой модели сосредоточенной емкости с коэффициентом теплообмена между блоками породы и проницаемыми трещинами равное $\alpha = \frac{\lambda_{\sigma}\beta}{m_{\sigma}^2} = 33,6$ ккал/м³/град/сут. Такой коэффициент теплообмена получается, если теплоемкость блоков $\lambda_{\sigma} = 84$ ккал/м/град/сут, мощность блоков $m_{\sigma} = 5$ м, коэффициент, учитывающий форму блоков, $\beta = 10$. Модель гетерогенно-блоковой среды также активно использовалась для интерпретации опытно-миграционных работ, выполненных в подольско-мячковском водоносном комплексе на

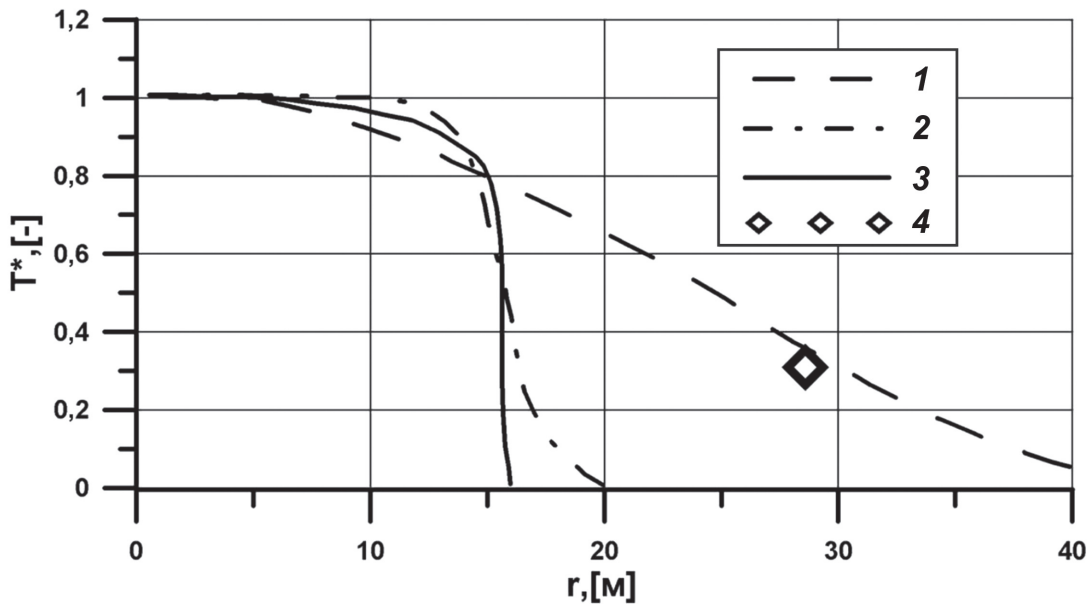


Рис. 3. Выбор модели распространения тепла по данным на 21 день проведения эксперимента: 1 — гетерогенно-блоковая сосредоточенной емкости, 2 — теплопроводности и конвекции, 3 — неограниченной емкости, 4 — фактические данные по наблюдательной скважине. По вертикальной оси — относительная температура, по горизонтальной — расстояние от нагнетательной скважины

Звенигородском полигоне МГУ [Петров, Лехов, 1986; Лехов, Кортуннов и др., 2019]. Следует также сказать, что быстрое распространение тепла можно также попытаться объяснить с помощью механизма термодисперсии, однако такая модель в данной статье не рассматривалась. Эксперимент (схема приведена на рис. 1) был проведен при изменяющихся расходе закачки и температуре закачиваемой воды. Получение теплофизических параметров по таким данным на основе использования всей выходной кривой может быть осуществлено с помощью численной модели, результаты разработки которой приведены ниже.

Разработка численной модели гетерогенно-блоковой среды и интерпретация эксперимента. В трещиноватых породах, которыми являются известняки каменноугольных водоносных горизонтов, на теплоперенос влияет отдача тепла в непроницаемые блоки пород. Гидрогеологические условия в районе исследований позволяют описать распространение тепла в среднекаменноугольном и окско-протвинском водоносных комплексах на основе двумерной нестационарной модели переноса с теплообменом между относительно проницаемыми трещинами и слабопроницаемыми блоками пород.

Такая модель может быть записана в виде баланса тепла для прямоугольной ячейки — фрагмента проницаемой части водоносного комплекса:

$$\begin{aligned} \hat{Q}_{i-1/2} + \hat{Q}_{i+1/2} + \hat{Q}_{k-1/2} + \hat{Q}_{k+1/2} + \hat{Q}_{c,i,k} + \hat{Q}_{b,i,k} = \\ = \frac{T_{i,k}^{t+\Delta t} - T_{i,k}^t}{\Delta t} n \cdot \Delta x_i \cdot \Delta y_k \cdot c_\theta, \end{aligned} \quad (2)$$

и для блоков пород, обменивающихся кондуктивно теплом с трещиноватыми зонами

$$\alpha(T'_{i,k} - T'_{b(i,k)}) = (1-n)c_\theta \frac{T'_{b(i,k)} - T'_{b(i,k)}}{\Delta t} \quad (3)$$

Адвективные потоки тепла, поступающие в ячейку, находятся по формулам

$$\begin{aligned} \hat{Q}_{i-1/2} &= vx_{i-1/2,k} [\gamma_{1,i,k} T'_{i,k} + (1-\gamma_{1,i,k}) T'_{i-1,k}] \cdot \Delta y_k c_\theta; \\ \hat{Q}_{i+1/2} &= -vx_{i+1/2,k} [\gamma_{3,i,k} T'_{i+1,k} + (1-\gamma_{3,i,k}) T'_{i,k}] \cdot \Delta y_k c_\theta; \\ \hat{Q}_{k-1/2} &= vy_{i,k-1/2} [\gamma_{4,i,k} T'_{i,k} + (1-\gamma_{4,i,k}) T'_{i,k-1}] \cdot \Delta x_i c_\theta; \\ \hat{Q}_{k+1/2} &= -vy_{i,k+1/2} [\gamma_{2,i,k} T'_{i,k+1} + (1-\gamma_{2,i,k}) T'_{i,k}] \cdot \Delta x_i c_\theta. \end{aligned} \quad (4)$$

Потоки тепла, уходящие из зон повышенной трещиноватости в массив пород или наоборот поступающие из массива, принимаются согласно:

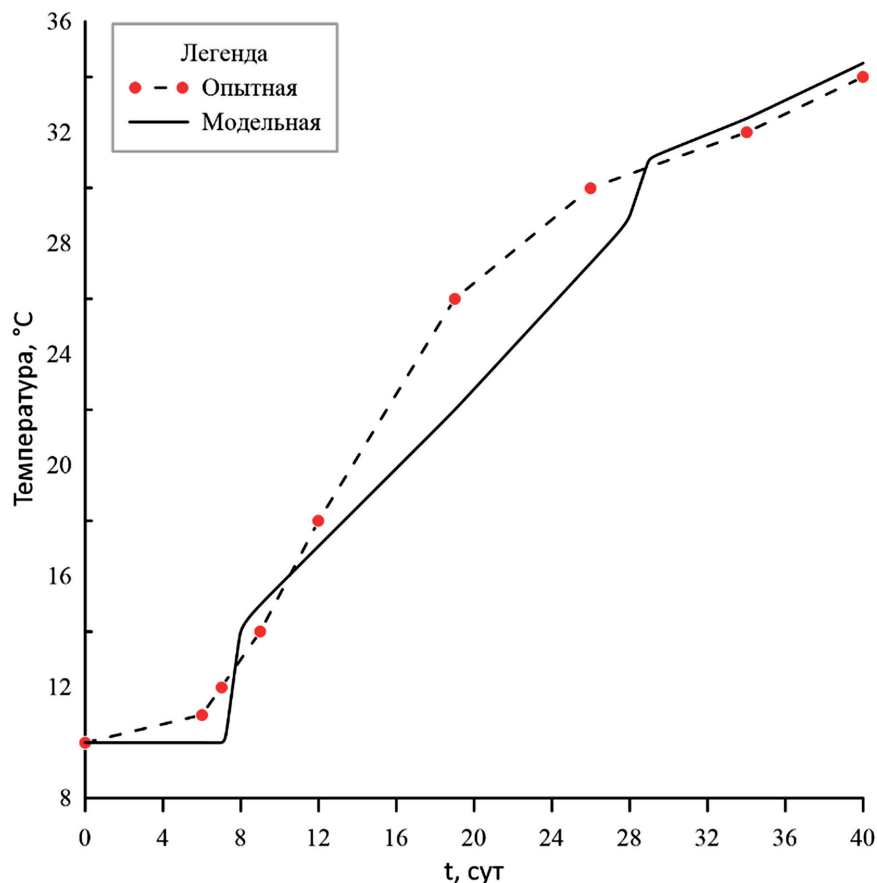
$$\hat{Q}_{b,i,k} = \alpha(T'_{b(i,k)} - T'_{i,k}) \Delta x_i \Delta y_k \quad (5)$$

Тепловой поток, поступающий в модельную ячейку, определяется согласно

$$\hat{Q}_{c,i,j} = \frac{c_\theta Q_{i,j} T_c^t}{m}, \quad (6)$$

где Δx_i и Δy_k — размеры ячеек модели вдоль координатных осей x и y соответственно, α — коэффициент теплообмена между блоками породы и проницаемыми трещинами, c_θ — теплоемкость блоков, Q — расход скважинной откачки-закачки, n — активная трещиноватость; m — мощность водовмещающей толщи, T_c — температура воды, закачиваемой в скважину, Δt — временной шаг, $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ — весовые коэффициенты для противоположной аппроксимации адвекции, $vx_{i-1/2,k}$ и $vx_{i+1/2,k}$ — средние скорости

Рис. 4. График сопоставления фактической (точки) и модельной (линия) температуры воды в наблюдательной скважине



фильтрации через стороны ячейки в направлении оси x , $v_{i,k-1/2}$ и $v_{i,k+1/2}$ — средние скорости фильтрации через стороны ячейки в направлении оси y .

Уравнения (2–3) решались явным методом для временного слоя $t + \Delta t$ на основе данных для предыдущего слоя t .

Входящие в выражение (4) скорости фильтрации могут быть определены на основе численного решения краевой задачи. Однако в данном случае границы расчетной области физически обосновать сложно. При этом информация о фильтрационной неоднородности в области, где потенциально может распространяться нагретая вода, отсутствует. В таком случае, скорости фильтрации в любой точке пласта могут быть получены на основе суперпозиции аналитического решения для скоростей фильтрации при работе скважин (в данном случае скорости фильтрации были получены с использованием решения Тейса) со скоростями невозмущенного (бытового) потока подземных вод [Лукнер, Шестаков, 1986].

$$\begin{aligned}
 vx &= -ki \sin \phi - \sum_{j=1}^N \frac{Q_j (x - x_j)}{2\pi m [(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2]}, \\
 vy &= -ki \cos \phi - \sum_{j=1}^N \frac{Q_j (y - y_j)}{2\pi m [(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2]},
 \end{aligned}
 \quad (7)$$

где k — коэффициент фильтрации, i — градиент невозмущенного (бытового потока), ϕ — угол между направлением бытового потока и осью x ,

N — количество скважин, x и y — координаты точек, в которых рассчитываются скорости.

Это позволяет оценить средние скорости фильтрации через стороны ячейки:

$$\begin{aligned}
 vx_{i-1/2,k} &= \frac{1}{\Delta y_k} \int_{y_k}^{y_k + \Delta y_k} vx dy = \\
 &= -\frac{1}{\Delta y_k} \left[\sum_{j=1}^N \frac{Q_j}{2\pi m} \left(\arctg \frac{y_k + \Delta y_k - y_j}{x_i - x_j} - \arctg \frac{y_k - y_j}{x_i - x_j} \right) + \right. \\
 &\quad \left. + \Delta y_k ki \cos \phi \right], \\
 vy_{i,k-1/2} &= \frac{1}{\Delta x_i} \int_{x_i}^{x_i + \Delta x_i} vy dx = \\
 &= -\frac{1}{\Delta x_i} \left[\sum_{j=1}^N \frac{Q_j}{2\pi m} \left(\arctg \frac{x_i + \Delta x_i - x_j}{y_k - y_j} - \arctg \frac{x_i - x_j}{y_k - y_j} \right) + \right. \\
 &\quad \left. + \Delta x_i ki \sin \phi \right].
 \end{aligned}
 \quad (8)$$

Описанный выше алгоритм был реализован на языке Fortran и использован для интерпретации эксперимента по закачке тепла и проведения прогнозных расчетов для обоснования охлаждения суперкомпьютера «Ломоносов».

Интерпретация заключалась в подборе коэффициента теплообмена α и теплоемкости блоков породы c_6 по выходной кривой (график мониторинга температуры во время проведения опыта). В резуль-

тате расчета большого количества вариантов были приняты:

коэффициент теплообмена вода/ порода — $33,6 \text{ кал/м}^3 \text{ град сут}$,

теплоемкость блоков породы — $574 \text{ ккал/м}^3 \text{ град}$.

Отклонения модельной выходной кривой от опытной (рис. 4) можно объяснить тем, что отсутствуют подробные данные об изменяющемся расходе откачки–закачки.

Численное моделирование теплопереноса для обоснования системы охлаждения суперкомпьютера «Ломоносов». На основе описанной выше численно-аналитической модели были выполнены прогнозные расчеты распространения тепла в окско-протвинском и совмещенных подольско-мячковском и каширском водоносных комплексах после возврата нагретой воды в результате охлаждения кондиционеров суперкомпьютера «Ломоносов».

Модельная сетка при моделировании теплопереноса в обоих комплексах равномерная и состоит из 200×200 ячеек со стороной 5 м. Такой размер расчетной области был выбран на основе предварительных численных экспериментов. Добивались, чтобы

область теплового пятна, вызванного закачкой, не выходила за границы расчетной области за время моделирования (5 лет).

Результаты расчетов. Прогнозы распространения тепла в окско-протвинском водоносном комплексе. На модели воспроизводилась система, использующая воды окско-протвинского водоносного комплекса. По данным региональной геофильтрационной модели Московской области градиент естественного потока в районе работ принимает значения 0,0005, что на порядок меньше значения для подольско-мячковского водоносного комплекса, и направлен на восток. Остальные параметры, используемые при расчете модели, представлены в табл. 3. Значение коэффициента фильтрации в данной таблице получено также на основе данных региональной геофильтрационной модели.

Результаты моделирования (см. график на рис. 6) показали, что при использовании вод окско-протвинского водоносного комплекса, имеющего мощность около 20 м, непрерывная работа системы охлаждения с повышением температуры в воде откачивающей скважины на 1 градус может продолжаться около 100 суток.

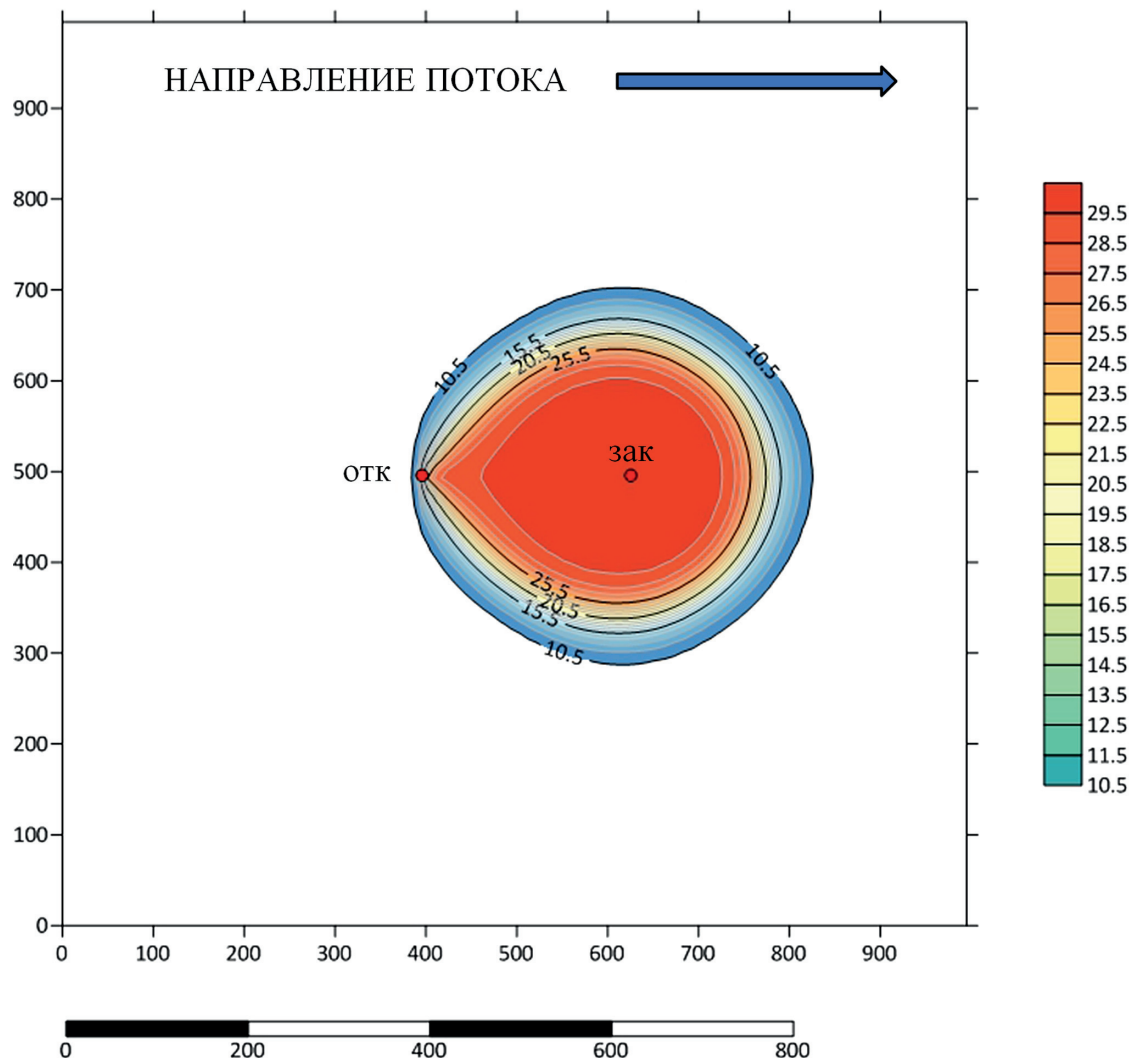


Рис. 5. Распространение теплового пятна через один год после начала закачки (окско-протвинский водоносный комплекс)

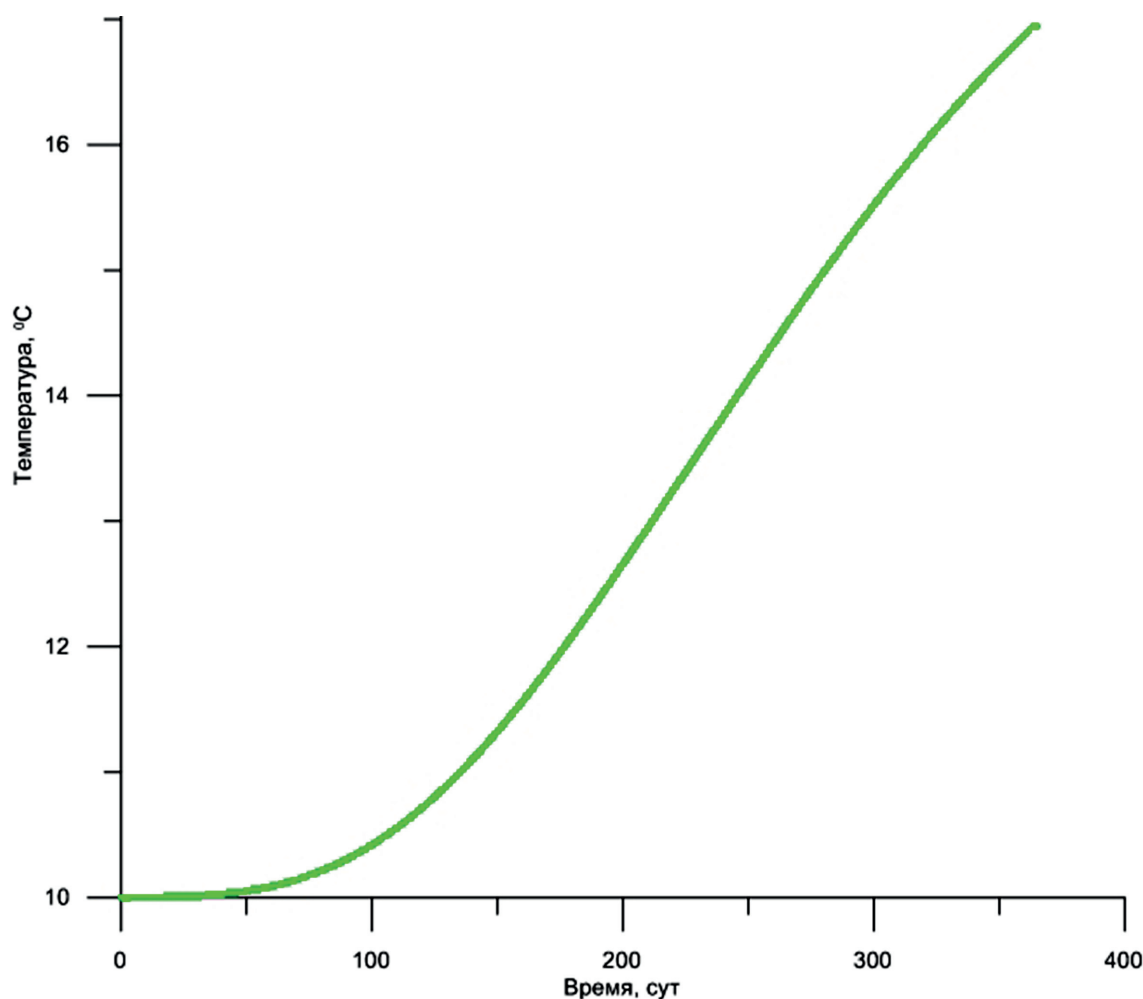


Рис. 6. График изменения температуры в откачивающей скважине на протяжении одного года (окско-протвинский комплекс)

При работе системы на протяжении одного года ореол нагретой вода из нагнетательной скважины достигнет откачивающей (рис. 5). При этом выходная кривая показывает увеличение температуры в откачивающей скважине (рис. 6) на 7 °C. Такой результат не позволяет рекомендовать использовать окско-протвинский водоносный комплекс для реализации системы охлаждения суперкомпьютера «Ломоносов».

Прогнозы распространения тепла в подольско-мячковском и каширском водоносных комплексах. Объединенные подольско-мячковский и каширский водоносные комплексы имеют большую мощность по сравнению с нижележащим окско-протвинским, что приведет к более медленному прогреванию и меньшим скоростям теплового фронта. Данные региональной геофильтрационной модели позволили определить градиент естественного потока, который в районе работ принимает значения 0,005 и направлен на запад. Остальные параметры, используемые при расчете модели, представлены в табл. 3.

Результаты моделирования (см. рис. 7–8) показали, что при использовании вод объединенных подольско-мячковского и каширского водоносных

комплексов, мощность которых можно принять 80 м, непрерывная работа системы охлаждения с повышением температуры в воде откачивающей скважины на 1 градус может продолжаться около года.

При работе данной системы на протяжении пяти лет нагретая вода из нагнетательной скважины достигнет откачивающей скважины, что приведет к уменьшению коэффициента полезного действия охлаждающей установки (рис. 8).

Обсуждение результатов. В данной работе рассматривалась возможность использования подземных вод окско-протвинского и объединенных подольско-мячковского и каширского водоносных комплексов для охлаждения кондиционеров суперкомпьютера «Ломоносов». Для прогноза была выбрана гетерогенно-блоковая модель. Результаты моделирования показали, что при использовании вод окско-протвинского водоносного комплекса, имеющего мощность около 20 м, непрерывная работа системы охлаждения с повышением температуры в воде откачивающей скважины на 1 градус может продолжаться около 100 суток.

Потенциально большими возможностями обладают объединенные подольско-мячковский и каширский водоносные комплексы, мощность

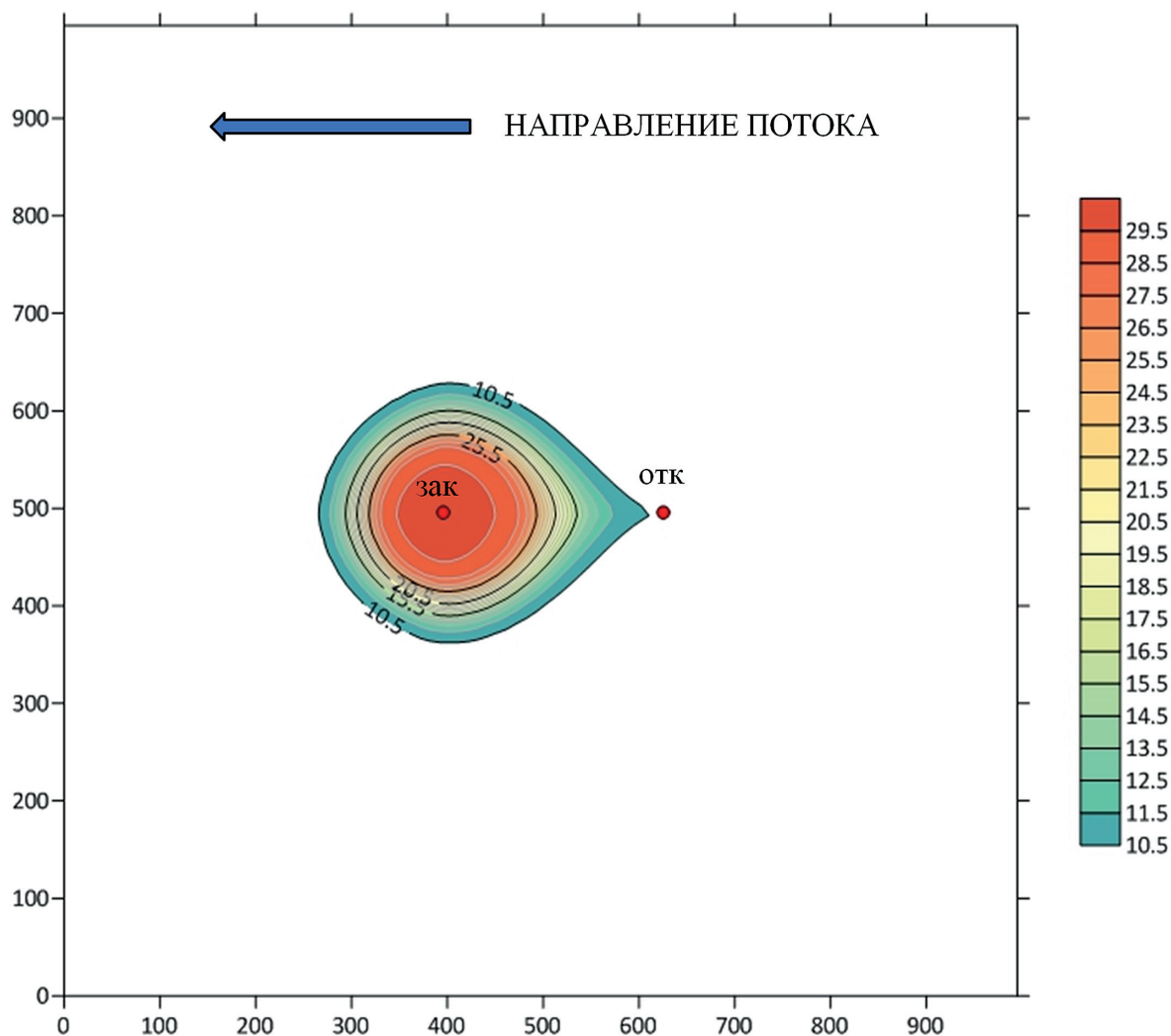


Рис. 7. Распространение теплового пятна через один год после начала закачки (подольско-мячковский и каширский водоносные комплексы)

которых можно принять 80 м. Однако экспериментальные данные о теплофизических свойствах данной толщи отсутствуют. Если принять модель переноса тепла и теплофизические свойства по результатам экспериментов в окско-протвинском комплексе, то, как показывают расчеты, эффективная непрерывная работа проектируемой системы охлаждения может продолжаться один год. Если использовать систему подземного охлаждения один месяц в году (период тополиного пуха), то можно продлить срок эксплуатации на более чем десятилетний период.

Таблица 3

Данные для расчета системы охлаждения

Данные	Значения для:	
	Подольско-мячковского и каширского водоносных комплексов	Окско-протвинского водоносного комплекса
Начальная температура T_0 , °C	10	10
Градиент естественного потока i [-]	0,005	0,0005
Расход откачки и закачки Q , м³/ч	160	160
Расстояние от закачивающей скважины до откачивающей, м	230	230
Мощность интервала закачки m , м	80	24
Температура закачиваемой воды T_c , °C	30	30
Коэффициент фильтрации k , м/сут	0,6	52

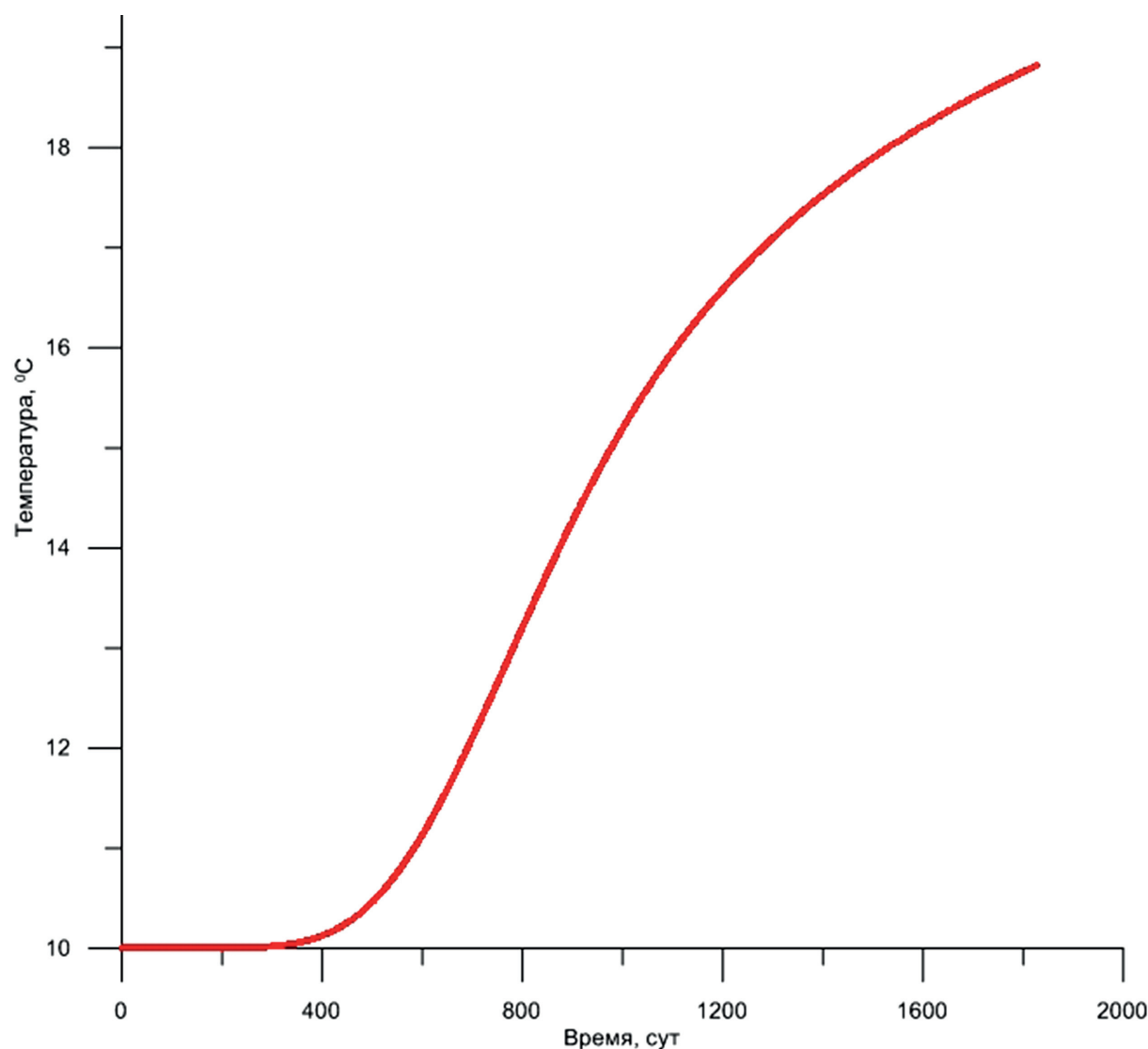


Рис. 8. График изменения температуры в откачивающей скважине на протяжении пяти лет (подольско-мячковский и каширский водоносные комплексы)

Длительность работы системы охлаждения может быть продлена, если откачивать нагретую воду в холодное время года. Поднятую нагретую воду можно использовать для отопления помещений 2-го гуманитарного корпуса МГУ имени М.В. Ломоносова. Для этого потребуется установка теплового насоса, который может использовать воды, нагретые после прохождения систем кондиционирования суперкомпьютера «Ломоносов». При функционировании данной установки через закачивающую скважину в выбранный водоносный комплекс будет возвращаться вода с более низкой температурой, чем в случае с охлаждением систем суперкомпьютера, что в свою очередь приведет к минимизации распространения теплового загрязнения. Подобное решение позволит эксплуатировать систему с двумя скважинами с максимальной эффективностью.

Анализ опыта эксплуатации подобных систем показывает незначительное влияние повышения температуры, связанное с возвратом нагретой воды, на изменение химического состава вод эксплуати-

руемых комплексов. При эксплуатации ожидается незначительное повышение кислотности, концентрации железа, марганца и нитратов. Изменений концентрации кальция, магния, сульфатов, хлоридов, натрия и калия не ожидается. Следовательно, проектируемая система может функционировать без нанесения ущерба химическому составу вод эксплуатируемых комплексов [Possemiers, 2014].

Заключение. Результаты работы показывают принципиальную возможность использования подземных вод для системы охлаждения суперкомпьютера «Ломоносов» и других подобных объектов на территории города Москвы. Для того, чтобы прогнозные расчеты были более достоверны, необходимы экспериментальные исследования (опытные откачки и опытно-миграционные работы с тепловым трассером) непосредственно в подольско-мячковском водоносном комплексе. Местом таких исследований может быть Звенигородский полигон МГУ, где пробурены экспериментальные скважины на данный водоносный комплекс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В.С., Хохлатов Э.М., Астрова Н.В. Низкопотенциальное тепло подземных вод // Гидрогеология. Инженерная геология. Итоги науки и техники. М., 1985. Т. 10. 74 с.
- Бочеввер Ф.М., Орадовская А.Е. Некоторые задачи теплопереноса в водоносных трещиноватых породах // Труды института ВОДГЕО. 1979. С. 50–61.
- Лехов А.В., Кортунов Е.В., Лехов В.А. и др. Детализация гидрогеологических характеристик водоносного горизонта в карстующихся известняках (Звенигородский Полигон МГУ имени М.В. Ломоносова) // Инженерная геология. 2019. Т. 14, № 1. С. 72–87.
- Лукнер Л., Шестаков В.М. Моделирование миграции подземных вод. М.: Недра, 1986. 208 с.
- Мироненко В.А., Румынин В.Г. Опыт-миграционные работы в водоносных пластах. М.: Недра, 1986. 240 с.
- Осипова В.И., Медведева О.П. Москва. Геология и город. 1997. 395 с.
- Петров А.Л., Лехов А.В. Вопросы методики опытно-миграционного опробования карбонатного водоносного горизонта // Водные ресурсы. 1986. № 2. С. 11–19.
- Расторгуев А.В., Куликова Т.М., Хохлатов Э.М. Исследования теплопереноса в водоносных трещиноватых породах // Водоснабжение, водоотведение, гидротехника и инженерная гидрогеоэкология. Вып. 13. ЗАО ДАР/ВОДГЕО. 2012. С. 23–28.
- Atam E. Ground-coupled heat pumps: Part 1 — Literature review and research challenges in modeling and optimal control // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 54. P. 1653–1667.
- Feng G. Simulation on the Groundwater Temperature Field of Groundwater Heat Pump System // Procedia Engineering. 2015. Vol. 121. P. 1556–1559.
- Sarbu I. General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings // Energy and Buildings. 2014. Vol. 70. P. 441–454.
- Possemiers M. Influence of Aquifer Thermal Energy Storage on groundwater quality: A review illustrated by seven case studies from Belgium // J. Hydrology: Regional Studies. 2014. Vol. 2. P. 20–34.
- Sheldon H.A., Schaubs P.M. Groundwater cooling of a supercomputer in Perth, Western Australia: hydrogeological simulations and thermal sustainability // Hydrogeology J. 2015. Vol. 23. P. 1831–1849.
- Zhou S. Study on ground temperature response of multilayer stratums under operation of ground-source heat pump // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 101. P. 173–182.
- Stuart J.Self. Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options // Applied Energy. 2013. Vol. 101. P. 341–348.
- Wildemeersch S. Coupling heat and chemical tracer experiments for estimating heat transfer parameters in shallow alluvial aquifers // J. Contaminant Hydrology. 2014. Vol. 169. P. 90–99.

Статья поступила в редакцию 17.08.2022,
одобрена после рецензирования 02.11.2023,
принята к публикации 22.05.2023