

УДК 004.75

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.46.3.009](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.46.3.009)

Подход к процессу взаимного информационного согласования элементов систем доставки данных на основе аукционной модели

А.А. Рубцов✉

*Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орёл,
Российская Федерация*

Резюме. В статье рассматривается представление о повышении эффективности процесса обслуживания запросов в одноранговых распределенных вычислительных системах на основе логического объединения их подмножества в пиринговые системы, а также предложен алгоритм взаимного информационного согласования элементов объединенной системы для обслуживания потока высокоинтенсивных запросов к данным на основе аукционной модели. В качестве метода и модели, обеспечивающей поддержку децентрализованного взаимодействия элементов пиринговой системы, предложена аукционная модель. Обоснован выбор аукционной модели – обратной аукционной модели Викри. С использованием теории мультиагентных систем рассмотрен подход для процесса формирования логической группы элементов пиринговой системы, определены соответствующие программные модули-агенты, обеспечивающие функции инициализации и реализации процесса проведения аукциона. С использованием теоретико-множественного представления определяются такие параметры, формирующие условия участия узлов-участников аукциона в процессе взаимного информационного согласования, как стоимостная функция и функция полезности. Детально рассмотрен выбор и обоснование функций компонентов аукционной модели. Определен вид стоимостной функции и функции полезности, используемых узлами – участниками аукциона. На основании состава функциональных компонентов элементов пиринговой системы, входящих в логическую группу, а также определения состава и вида функций, реализуемых этими компонентами, разработана схема алгоритма реализации обратной аукционной модели Викри, обеспечивающая формирование и функционирование логической группы элементов пиринговой системы.

Ключевые слова: распределенные системы, система доставки данных, пиринговые системы, система массового обслуживания, аукционная модель.

Для цитирования: Рубцов А.А. Подход к процессу взаимного информационного согласования элементов систем доставки данных на основе аукционной модели. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1621> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.009

An approach to the process of mutual information coordination of elements of data delivery systems based on an auction model

A.A. Rubtsov✉

Russian Federation Security Guard Service Federal Academy, Oryol, the Russian Federation

Abstract: The article discusses the idea of increasing the efficiency of the process of servicing requests in peer-to-peer distributed computing systems based on the logical combination of their subset into peer-to-peer systems, and also proposes an algorithm for mutual information coordination of elements of the integrated system for servicing a flow of high-intensity requests for data based on the auction model. An auction model is proposed as a method and model that provides support for decentralized interaction between elements of a peer-to-peer system. The choice of the auction model – the inverse Vickrey auction model – is justified. Using the theory of multi-agent systems, an approach for the process of

forming a logical group of elements of a peer-to-peer system is considered, and the corresponding software agent modules are identified that provide the functions of initializing and implementing the auction process. Using a set-theoretic representation, parameters are determined that form the conditions for the participation of nodes participating in the auction in the process of mutual information coordination, such as a cost function and a utility function. The choice and justification of the functions of the components of the auction model are considered in detail. The type of cost function and utility function used by the nodes participating in the auction is determined. Based on the composition of the functional components of the peering system elements included in the logical group, as well as determining the composition and type of functions implemented by these components, an algorithm for implementing the Vickrey reverse auction model has been developed, ensuring the formation and functioning of a logical group of peering system elements.

Keywords: distributed systems, data delivery system, peer-to-peer systems, queuing system, auction model.

For citation: Rubtsov A.A. An approach to the process of mutual information coordination of elements of data delivery systems based on an auction model. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1621> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.009 (In Russ.).

Введение

Одной из ключевых проблем в многоузловых распределенных вычислительных архитектурах, примерами которых выступают системы кэш-памяти многоядерных процессоров, сервисы распределенных очередей сообщений, сети доставки контента и ряд других систем, отнесенных к обобщенному классу систем доставки данных (СДД), является проблема согласованности, доступности и устойчивости данных, обобщенная в теореме CAP (Consistency, Availability, Partition tolerance) [1]. При этом с ростом масштабов таких систем и уровнем их распределенности, а также, с существенно возросшими характеристиками потоков запросов на доставку требуемых данных, возрастает и сложность применяемых для решения этой проблемы методов и алгоритмов.

Одним из основных недостатков, существующих СДД, инвариантным их классу является высокая степень автономности отдельной СДД (далее, элемента множества СДД), определяющая зависимость между повышением интенсивности пользовательских запросов на некоторые данные и снижением эффективности их обслуживания в силу недостаточной вычислительной мощности элемента СДД и/или недостаточной пропускной способности канала его взаимодействия с пользователем.

Решение указанной проблемы может быть осуществлено за счет логического объединения нескольких элементов СДД для обслуживания запросов высокой интенсивности [2]. При этом элемент СДД, к которому поступают высокоинтенсивные запросы на определенный тип данных, реплицирует эти данные на другие СДД, входящие в логическую группу $L_{\text{СДД}}$, а также перенаправляет на них часть высокоинтенсивных запросов.

Рассмотрим Рисунок 1. Пусть в некоторый момент времени t_k на элемент СДД₁ поступают запросы r_k^d к данным d_k , имеющие высокую интенсивность. С целью повышения эффективности их обслуживания, элемент СДД₁ с использованием механизма взаимного информационного согласования $L_{\text{СДД}}^{\text{ВИС}}$ инициирует формирование логической группы $L_{\text{СДД}}$. Предположим, что в результате процесса такого формирования, в состав группы $L_{\text{СДД}}$ вошли элементы СДД₂ и СДД₃. Элемент СДД₁ реплицирует данные d_k на элементы СДД₂ и СДД₃ и обеспечивает перенаправление на них части собственных запросов r_k^d . Таким образом, обслуживание высокоинтенсивных

запросов r_k^d осуществляется не одним, а тремя элементами СДД, входящими в динамически сформированную логическую группу $L_{\text{СДД}}$.

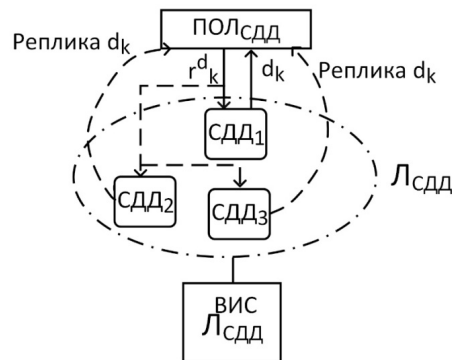


Рисунок 1 – Принцип обслуживания высокоинтенсивных запросов логической группой, состоящей из трех элементов СДД

Figure 1 – The principle of serving high-intensity requests by a logical group consisting of three elements of the DDS

Одним из важных вопросов, связанных с процессами формирования, функционирования и расформирования логической группы $L_{\text{СДД}}$ является вопрос обоснованного выбора механизма взаимного информационного согласования $L_{\text{СДД}}^{\text{ВИС}}$ [3]. Элементы СДД обладают высокой степенью автономности, что не предполагают наличия централизованного механизма их ВИС. Таким образом, выбор механизма $L_{\text{СДД}}^{\text{ВИС}}$ лежит в плоскости децентрализованных методов ВИС [4, 5].

Для участия в логической группе $L_{\text{СДД}}$ элементы СДД₂ и СДД₃ должны:

- иметь на своих входах такую интенсивность обслуживания собственных запросов r_k^d , чтобы реализовать обслуживание дополнительных запросов, перенаправляемых с элемента СДД₁;
- иметь свободный объем хранилища данных S_d , достаточный для размещения реплики данных d_k , либо принять решение о возможности замещения части собственных данных d_k , например, по критерию их востребованности в запросах r_k^d , репликой данных d_k элемента СДД₁.

Выполнение этих условий носит стоимостной характер и связано с оцениванием элементами СДД параметров, определяющих «стоимость» обслуживания как собственных запросов r_k^d , так и запросов, перенаправляемых с элемента СДД, являющегося инициатором формирования логической группы $L_{\text{СДД}}$. Очевидно, что оптимальным решением, связанным с участием элемента СДД в составе логической группы $L_{\text{СДД}}$ является минимизация «стоимости» обслуживания собственных запросов r_k^d и максимизация «прибыли», получаемой от обслуживания перенаправляемых запросов [6].

Указанная особенность механизма ВИС определяет выбор и обоснование методов и моделей его реализации, поддерживающих стоимостные параметры взаимодействия элементов системы.

Материалы и методы

Наиболее известные из методов и моделей, обеспечивающие поддержку децентрализованного взаимодействия элементов, рассматриваются в теории аукционных игр (ТАИ) [7].

Важными особенностями аукционной модели являются схема ее проведения и принцип формирования стоимости выигрыша [8]. В настоящем исследовании делается обоснование предположения об эффективности использования в качестве механизма $L_{СДД}^{ВИС}$ модифицированного варианта аукционной модели Викри [9].

Аукцион Викри проводится по закрытой (sealed-bid) схеме, то есть каждый участник аукциона осведомлен только о значении собственной ставки. Также эта модель является моделью второй цены (second price), то есть лот аукциона передается по стоимости, которую предложил второй по списку участник аукциона.

Элемент $СДД_i$, для которого интенсивность потока запросов r_k^d превышает пороговое значение, выступает в роли покупателя: объема хранилища данных S_d других элементов множества $N_{СДД}$ для передачи им реплики данных d_k , а также их возможности перенаправлять им часть потока запросов r_k^d . То есть, в основу подобной схемы положен принцип «один-ко-многим», который может быть реализован в модифицированной аукционной модели – обратной аукционной модели Викри. Ее обобщенная схема представлена на Рисунке 2.

Обратная аукционная модель Викри содержит три типа функциональных узлов участников аукциона (А, Пр, П):

1. Узел-покупатель (П). Реализует функции передачи предложения (тип покупаемого лота – объема хранилища данных S_d для реплицируемых данных d_k).

2. Узел-продавец (Пр). Реализует функции формирования максимального значения ставки $b_{МАХ}^N$ – стоимости лота аукциона объема хранилища данных S_d для реплицируемых данных d_k и передачи его узлу-аукционисту, а также передачи узлу-покупателю лота аукциона, получения значения прибыли Pr_1 .

3. Узел-аукционист (А). Реализует следующие функции:

- коммуникацию с остальными типами узлов участников аукциона;
- ведение баз ставок от узлов-покупателей и предложений от узлов-продавцов;
- сортировку значений максимальных значений ставок $b_{МАХ}^N$ узлов-покупателей;
- вычисление прибыли узла-покупателя – победителя аукциона на основе принципа «second price» – $Pr_1 = b_{МАХ}^N - (b_{МАХ}^N - 1)$.

– вычисление прибыли узла-покупателя – победителя аукциона на основе принципа «second price» – $Pr_1 = b_{МАХ}^N - (b_{МАХ}^N - 1)$.

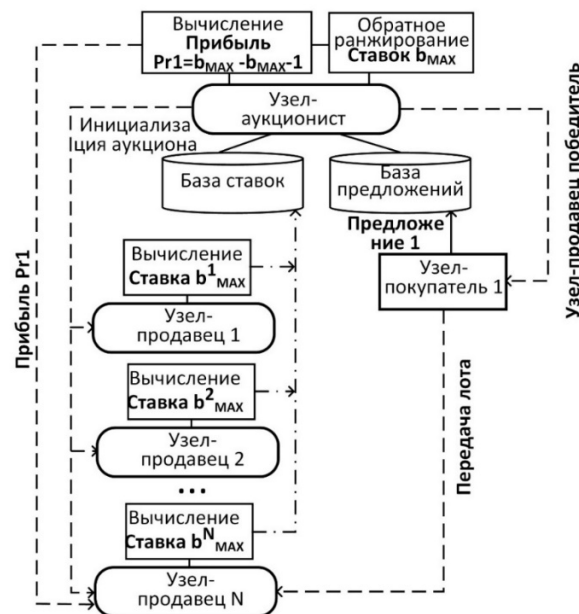


Рисунок 2 – Обобщенный вид обратной аукционной модели Викри
Figure 2 – A generalized view of the reverse Vickrey auction model

В основе реализации обратной аукционной модели Викри для процесса формирования логической группы $L_{\text{СДД}}$ предлагается использование мультиагентного подхода, рассматриваемого теорией мультиагентных систем (МАС). Согласно этому подходу для реализации механизма $L_{\text{СДД}}^{\text{ВИС}}$ на основе обратной аукционной модели Викри, в составе программного обеспечения каждого элемента СДД выделяются соответствующие программные модули-агенты, обеспечивающие функции инициализации и реализации процесса проведения аукциона [10]:

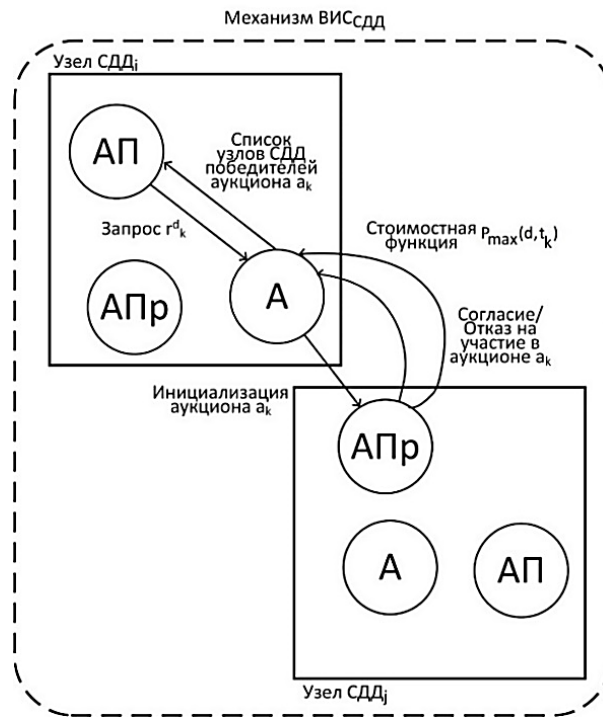


Рисунок 3 – Функциональные компоненты механизма взаимного информационного согласования элементов СДД в составе логической группы
Figure 3 – Functional components of the mechanism of mutual information coordination of DDS elements as a part of a logical group

- агент покупателя (далее АП);
- аукционист (далее А);
- фиксированное множество агентов продавца (далее АПр), которые являются участниками аукциона. В общем виде указанные выше функциональные компоненты представлены на Рисунке 3.

Функциональный компонент А начинает процесс аукциона в контексте запроса функционального компонента АП.

Глобальной целью функционального компонента А является получение от функциональных компонентов АПр других систем СДД, участвующих в аукционе, совокупности объема хранилищ S_d , обеспечивающих размещение реплик данных d_k , необходимых пользователю, от имени которого функционирует компонент АП.

Определение стоимостной функции и функции полезности

Рассмотрим теоретико-множественное представление функциональной структуры, представленной на Рисунке 3:

- N – множество систем СДД, где $i \in N$;

– R – множество запросов пользователей на получение данных, где $r \in R$;
– D – множество данных, размещенных в хранилищах элементов множества N , где $d \in D$.

Функциональные компоненты АП элементов множества N , участвующих в аукционе используют стоимостную функцию для определения значения p_j – «суммы» участия (логической единицы оплаты участия в аукционе), которая может быть потрачена для получения копии данных d_k в хранилище j -м элементом множества N .

Дополнительно они используют функцию полезности, для определения целесообразности участия в аукционе. На ее основе формируется подтверждение согласия на участие в аукционе [11].

Функциональный компонент A , инициировавшего аукцион элемента множества N , получает значения p_j от функциональных компонентов АПр всех участвующих в аукционе элементов множества N , давших подтверждение согласия на участие в аукционе и формирует из них подмножество элементов $M \subset N$, значение p_j участия которых является минимальным.

После этого выбора функциональный компонент A инициировавшего аукциона элемента множества N , реализует процесс репликации данных d_k на элементы подмножества M , а также передает им второе по величине значение p_j , являющееся «прибылью» – вознаграждением за участие в аукционе.

Очевидно, что важными задачами исследования являются определение вида стоимостной функции $P_{\max}(d, t_k)$ и функции полезности $\Pi_i(d_k, t_k)$, используемых узлами – участниками аукциона.

Определим стоимостную функцию $P_{\max}(d, t_k)$ выражением:

$$P_{\max}(d, t_k) = \beta \left[\frac{\sum_{j=1}^{k-1} \{p_j + \gamma\} \delta(r_k^d, r_j^d) \phi(r_k^l, r_j^l) e^{-\lambda(t_k - t_j)}}{k-1} \right] - \alpha \cdot \partial(L_i, t_k). \quad (1)$$

Как видно из выражения (1), значение функции $P_{\max}(d, t_k)$ представлено разностью значения прогноза значения p_j с момента времени t_k с учетом всех ее значений до момента предшествующего моменту времени t_{k-1} и значения «штрафа» за невозможность обслужить в момент времени t_k запроса r_k^d .

Наряду с определением стоимостных характеристик, связанных с обслуживанием запроса r_k^d , функциональный компонент АПр i -го элемента множества N должен принять решение о целесообразности участия в аукционе a_k . Подобное решение для указанного функционального компонента базируется на абстракции стоимости хранения данных $d_k \in D$ в соответствующем хранилище S_a^i . Очевидно, что значение стоимости хранения возрастает в тех случаях, когда для размещения данных $d_k \in D$ в силу несоблюдения условия $S_a^i \geq 0$, из хранилища S_a^i требуется удалить некоторые данные $d_j \in D$ для обслуживания j предшествующих запросов.

В соответствии с этим определим функцию полезности $\Pi_i(d_k, t_k)$ функционального компонента АП i -го элемента множества N как:

$$\Pi_i(d_k, t_k) = S_{d_k}^i + X(d_k, t_k) \pm \psi(\Pi_i), \quad (2)$$

где $S_{d_k}^i$ – требуемый объем хранилища S_a^i , который можно определить выражением:

$$S_{d_k}^i = \mathfrak{R}(d_k) \cdot \varphi(d_k), \quad (3)$$

где $\mathfrak{R}(d_k)$ – требования к объему хранилища, для хранения данных $d_k \in D$, определяемые пользователем системы СДД, а $\varphi(d_k)$ – стоимость их хранения, определяемая функциональным компонентом АП i -го элемента множества N ; $X(d_k, t_k)$ –

функция «дохода» (прибыли) от размещения данных $d_k \in D$ в хранилище S^i_d , которую можно определить выражением:

$$X(d_k, t_k) = \chi_{d_k} - \chi_{d_j}, \quad (4)$$

где χ_{d_k} и χ_{d_j} – значение величины «дохода» от хранения данных $d_k \in D$ и $d_j \in D$ (предполагаемых к удалению из хранилища S^i_d); $\psi(\Pi_i)$ – функция «заинтересованности» функционального компонента АП i -го элемента множества N для участия в аукционе a_k , применяемая в виде дополнительного условия для усиления/ослабления функции полезности в конкретных системах СДД (например, в системах, где управлением ведется не на алгоритмическом уровне, а с использованием ЛПР).

Результаты

На основании предложенного на Рисунке 3 состава функциональных компонентов элементов СДД, входящих в логическую группу $L_{СДД}$, а также определения состава и вида функций, реализуемых этими компонентами, в рамках настоящего исследования разработана схема алгоритма реализации обратной аукционной модели Викри, обеспечивающая формирование и функционирование логической группы $L_{СДД}$.

В обобщенном виде схема разработанного алгоритма представлена на Рисунке 4.

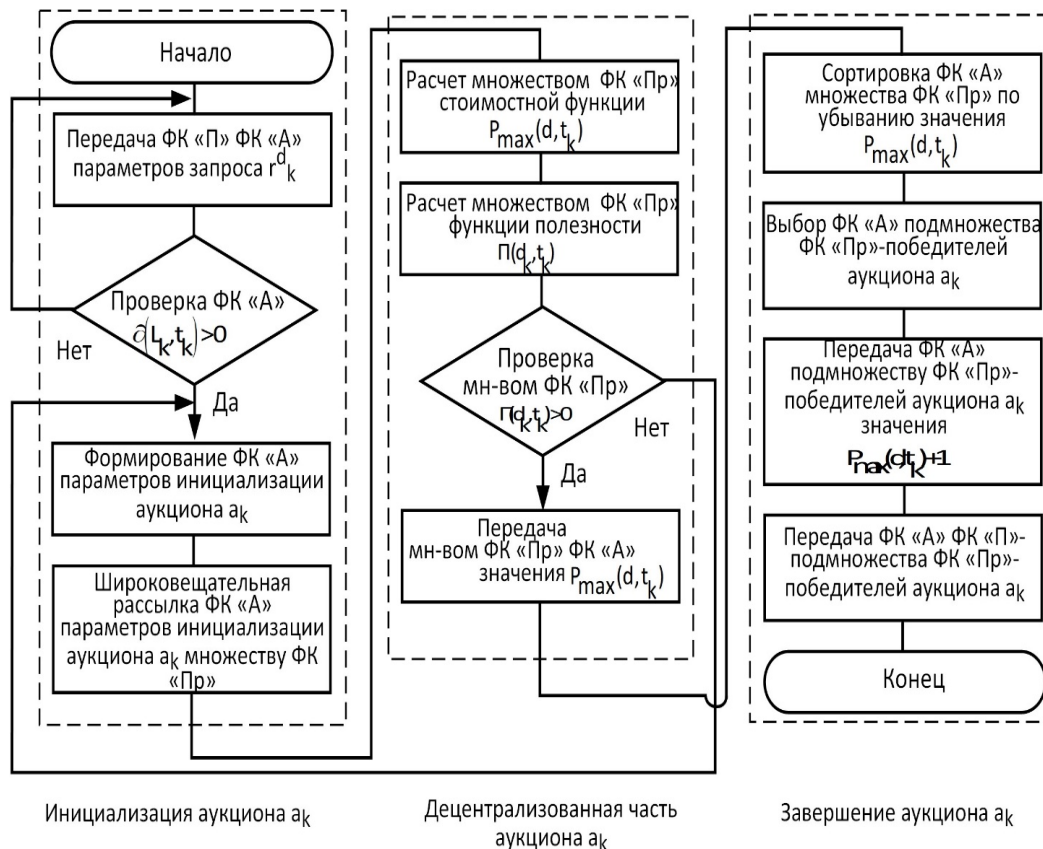


Рисунок 4 – Обобщенная схема алгоритма реализации обратной аукционной модели Викри для формирования логической группы элементов СДД

Figure 4 – A generalized scheme of the algorithm for implementing the reverse Vickrey auction model for the formation of a logical group of DDS elements

Из Рисунка 4 видно, что, в силу распределенности функциональных компонентов, участвующих в аукционе a_k , этапы алгоритма разделены на:

- централизованную составляющую, включающую шаги инициализации и завершение аукциона a_k ;
- децентрализованную составляющую, включающую этапы проведения аукциона a_k .

В свою очередь централизованная составляющая содержит этапы:

1. Реализуемые функциональным компонентом А узла СДД – инициатора аукциона на этапе инициализации аукциона:

- цикла проверки параметров запроса r_k^d на предмет определения повышения интенсивности потока его обслуживания;
- вычисления значения функции $\partial(L_i, t_k)$ и проверки условия $\partial(L_i, t_k) > 0$, определяющего триггер инициализации аукциона a_k ;
- формирования параметров инициализации аукциона (объем данных d_k , интенсивность потока запросов r_k^d);
- широковещательная рассылка параметров инициализации аукциона a_k доступным узлам СДД.

2. Реализуемые функциональным компонентом А узла СДД – инициатора аукциона на этапе завершения аукциона:

- сортировка значений стоимостной функции, полученных от подмножества функциональных компонентов АПр с целью определения списка минимальных значений;
- формирование на основе полученного списка элементов логической группы $L_{\text{СДД}}$;
- передача указанным элементам СДД значений выигрыша аукциона a_k и сообщения об отказе участия в аукционе остальным элементами СДД.

Децентрализованная составляющая алгоритма реализуется параллельно подмножеством элементов СДД, получивших параметры инициализации аукциона a_k :

- расчет значения стоимостной функции $P_{\max}(d, t_k)$;
- расчет значения функции полезности $P_i(d_k, t_k)$;
- проверка условия $P_i(d_k, t_k) > 0$;
- передача рассчитанного значения $P_{\max}(d, t_k)$ при выполнении условия $P_i(d_k, t_k) > 0$;
- передача отказа от участия в аукционе при невыполнении условия $P_i(d_k, t_k) > 0$.

Заключение

Достигнута цель работы по определению подхода к повышению эффективности процесса обслуживания запросов в одноранговых распределенных вычислительных системах на основе логического объединения их подмножества в пиринговые системы в процессе взаимного информационного согласования элементов систем доставки данных на основе аукционной модели. Определен вид таких параметров, формирующих условия участия узлов-участников аукциона в процессе взаимного информационного согласования как стоимостная функция и функция полезности. Предложен алгоритм взаимного информационного согласования элементов объединенной системы для обслуживания потока высокоинтенсивных запросов к данным. Дальнейшим направлением исследования является имитационное моделирование предложенного подхода с целью подтверждения теоретических выводов о повышении эффективности процесса обслуживания запросов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Gilbert S., Lynch N. Perspectives on the CAP Theorem. *Computer*. 2012;45(2):30–36. <https://doi.org/10.1109/MC.2011.389>
2. Amini L., Shaikh A., Schulzrinne H. Effective peering for multi-provider content delivery services. In: *IEEE Infocom 2004, 07-11 March 2004, Hong Kong, China*. IEEE; 2004. <https://doi.org/10.1109/INFCOM.2004.1356973>
3. Khan Pathan A.-M., Broberg J., Bubendorfer K., Kim K.H., Buyya R. An Architecture for Virtual Organization (VO)-Based Effective Peering of Content Delivery Networks. In: *UPGRADE-CN'07: Proceedings of the Second Workshop on Use of P2P, GRID and Agents for the Development of Content networks, 26 June 2007, Monterey, California, USA*. New York: Association for Computing Machinery; 2007. pp. 29–38. <https://doi.org/10.1145/1272980.1272989>
4. Rowstron A., Druschel P. Pastry: Scalable, Decentralized Object Location, and Routing for Large-Scale Peer-to-Peer Systems. *Lecture Notes in Computer Science*. 2001;2218:329–350. https://doi.org/10.1007/3-540-45518-3_18
5. Wang X., Ma R.T.B. On Private Peering Agreements between Content and Access Providers: A Contractual Equilibrium Analysis. *Proceedings of the ACM on Measurement and Analysis of Computing Systems*. 2020;4(3). <https://doi.org/10.1145/3428326>
6. Khan Pathan A.-M., Buyya R. Economy-based Content Replication for Peering Content Delivery Networks. In: *Seventh IEEE International Symposium on Cluster Computing and the Grid (CCGrid '07), 14-17 May 2007, Rio De Janeiro, Brazil*. IEEE; 2007. pp. 887–892. <https://doi.org/10.1109/CCGRID.2007.48>
7. Рожкова Т.С. Подходы к использованию аукционных методов для управления ресурсами в распределенной вычислительной системе. В сборнике: *Научная сессия ТУСУР–2020: Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2020»: в 3 частях: Часть 2, 13-30 мая 2020 года, Томск, Россия*. Томск: В-Спектр; 2020. С. 64–67.
Rozhkova T.S. Podkhody k ispol'zovaniyu auktsionnykh metodov dlya upravleniya resursami v raspredelennoi vychislitel'noi sisteme. In: *Nauchnaya sessiya TUSUR–2020: Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh "Nauchnaya sessiya TUSUR–2020": v 3 chastyakh: Part 2, 13-30 May 2020, Tomsk, Russia*. Tomsk: V-Spektr; 2020. pp. 64–67. (In Russ.).
8. Bubendorfer K., Thomson W. Resource Management Using Untrusted Auctioneers in a Grid Economy. In: *2006 Second IEEE International Conference on e-Science and Grid Computing (e-Science'06), 04-06 December 2006, Amsterdam, Netherlands*. IEEE; 2006. <https://doi.org/10.1109/E-SCIENCE.2006.261158>
9. Vickrey W. Counterspeculation, Auctions, and Competitive Sealed Tenders. *The Journal of Finance*. 1961;16(1):8–37. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.1961.tb02789.x>
10. Norman T.J., Preece A., Chalmers S., Jennings N.R., Luck M., Dang V.D., Nguyen T.D., Deora V., Shao J., Gray W.A., Fiddian N.J. CONOISE: Agent-Based Formation of Virtual Organisations. In: *Research and Development in Intelligent Systems XX: Proceedings of AI2003, the Twenty-third SGAI International Conference on Innovative Techniques and Applications of Artificial Intelligence, 15-17 December 2003, Peterhouse College, Cambridge, UK*. London: Springer; 2004. pp. 353–366. https://doi.org/10.1007/978-0-85729-412-8_26
11. Ogston E., Vassiliadis S. A peer-to-peer agent auction. In: *AAMAS '02: Proceedings of The First International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent*

Systems: Part 1, 15-19 July 2002, Bologna, Italy. New York: Association for Computing Machinery; 2002. pp. 151–159. <https://doi.org/10.1145/544741.544776>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Рубцов Алексей Алексеевич, сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орёл, Российская Федерация.
Alexey A. Rubtsov, employee of the Russian Federation Security Guard Service Federal Academy, Oryol, the Russian Federation.
e-mail: vostbur@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 02.07.2024; одобрена после рецензирования 12.07.2024; принята к публикации 18.07.2024.

The article was submitted 02.07.2024; approved after reviewing 12.07.2024; accepted for publication 18.07.2024.