

УДК 004.4, 004.75

*Е.В. Душутина, Ю.А. Столяренко*  
*Санкт-Петербург, Россия*

## **ФОРМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ВРЕМЕННОГО ОБЯЗАТЕЛЬСТВА В МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

*E.V. Dushutina, Yu.A. Stolyarenko*  
*St.-Petersburg, Russia*

### **FORMAL MODEL OF TEMPORAL COMMITMENT IN REAL-TIME MULTI-AGENT SYSTEMS**

Представлена формальная модель взаимодействия агентов в ресурсно-критических многоагентных системах с использованием математического аппарата теории множеств и отношений и применением RTCTL. Предложено расширение концепции обязательства посредством внесения временного параметра в качестве условия выполнимости обязательства.

МНОГОАГЕНТНАЯ СИСТЕМА. РЕАЛЬНОЕ ВРЕМЯ. КОММУНИКАТИВНЫЙ АКТ. АГЕНТ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ. ВРЕМЕННОЕ ОБЯЗАТЕЛЬСТВО. АГЕНТНАЯ АРХИТЕКТУРА. FIPA. RTCTL.

The formal model of inter-agent communication in real-time multi-agent systems is presented on the basis of the set theory and logics, using RTCTL. Proposed the extension of the commitment concept by embedding the temporal parameter as a necessary condition of the correct execution in real time.

MULTI-AGENT SYSTEM. REAL TIME. COMMUNICATIVE ACT. REAL-TIME AGENT. TEMPORAL COMMITMENT. AGENT ARCHITECTURE. FIPA. RTCTL.

В данной статье рассмотрен один из возможных подходов к формализованному описанию взаимодействия агентов в ресурсно-критических многоагентных системах (МАС). Предложено расширение концепции обязательства посредством внесения временного параметра в качестве условия выполнимости обязательства. Составлена семантика языка временного обязательства. Представлена формальная модель взаимодействия с использованием математического аппарата теории множеств и отношений, с применением RTCTL.

Современные многоагентные технологии позволяют создавать системы нового уровня сложности, рассматривая их как сообщество автономных кооперирующихся и взаимодействующих друг с другом компонентов с возможностью рас-

пределения управления и данных. Подходы и методы, традиционно применяемые для построения многоагентных систем (МАС) информационного характера в системах искусственного интеллекта, представляют интерес и для реализации в системах управления и системах реального времени. Теоретические исследования и технологические разработки в данной области ведутся достаточно широко и активно. Наибольшую сложность представляют вопросы, связанные с процессами взаимодействия агентов при коллективном решении практических задач, поскольку каждый агент, выполняющий свою подзадачу, имеет лишь частичное представление об общей задаче и должен постоянно взаимодействовать с другими агентами. Ситуация еще более усложняется, если необходимо учитывать взаимодействие агентов

в условиях ресурсных ограничений и реального времени. Агент, решая свою задачу, должен координировать и синхронизировать свои действия с другими агентами в системе, при этом у него, как правило, нет возможности полностью или частично контролировать выполнение задач другими агентами. Таким образом, он нуждается в определенной гарантии со стороны других агентов: завершить выполнение задачи в установленный срок и соблюсти заданные ограничения на потребление ресурсов.

В связи с этим в рамках проводимых исследований предлагается формирование некоторого унифицированного набора коммуникационных средств и моделей агентов в соответствии с существующими современными стандартами и спецификациями взаимодействия в составе платформы, предназначенной для разработки ресурсно-критических многоагентных систем (МАС), функционирующих в условиях заданных ограничений.

Предлагается формализованный способ описания взаимного поведения агентов МАС указанного класса. Каждый агент, входящий в состав такой МАС, должен получать информацию о внешней среде и непосредственно влиять на нее через свои действия. При этом существует непустое подмножество агентов, удовлетворяющих требованиям функционирования в реальном масштабе времени, что означает выполнение действия за выделенное время, гарантируя соответствие скорости реакции агента скорости изменения среды.

В качестве основы совместных действий будем рассматривать структуры *обязательств* (широко используемые в социальных системах). По сути обязательство – это форма определения связей между агентами. Исходя из существующих обязательств, агент может формировать поведенческую и событийную модели функционирования системы, т. е. предвидеть поведение других агентов, прогнозировать будущие события и планировать собственные действия.

Чаще всего встречаются обязательства одного агента перед другим. Обычно они связаны с обещанием одного агента другому выполнить действие по его просьбе. В соответствии с [1] обязательство можно представить в виде:

$$C = \langle id, x, y, p \rangle,$$

где  $id$  – уникальный идентификатор каждого

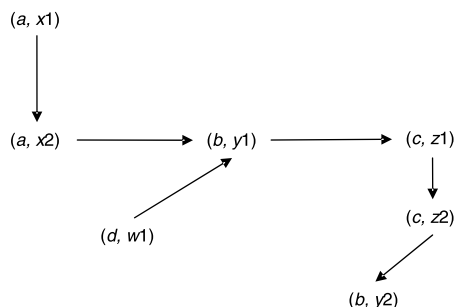


Рис. 1. Фрагмент графа зависимостей между действиями агентов

социального обязательства;  $x$  и  $y$  – агенты, участвующие в социальном обязательстве:  $x$  – агент, выполняющий задачу (должник);  $y$  – агент, запрашивающий выполнение задачи (кредитор);  $p$  – условие, которое должно быть выполнено для активизации обязательства.

Обязательства агента могут побуждать его к деятельности, в частности, совместной деятельности с другими агентами. Именно обязательства агентов друг перед другом лежат в основе их действий. Пусть  $A = \{a, b, c, d\}$  – множество агентов, а  $ACT = \{X, Y, Z, W\}$  – множество действий, которые им надо выполнить. Здесь  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  – множество действий агента  $a$ ,  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$  – множество действий агента  $b$  и т. п.

На основе обязательств агентов друг перед другом формируются структуры зависимостей между их действиями. Так, если агент  $a$  взял обязательство перед агентом  $b$  выполнить действие  $x$ , то агент  $b$  также взял обязательство перед  $c$  выполнить действие  $y$ , зная, что действие  $y$  зависит от действия  $x$ . Подобные зависимости можно записать в виде  $(b, y) \leftarrow (a, x)$ , т. е. действие  $y$  агента  $b$  зависит от действия  $x$  агента  $a$  (связь  $\leftarrow$  интерпретируется как влияние).

На рис. 1 показаны различные виды зависимостей между действиями [2]. Во-первых, существуют элементарные зависимости текущих действий агентов от других действий тех же самых агентов. Во-вторых, чаще всего бывают зависимости действий агентов одновременно как от своих, так и от чужих действий. В частности, действие  $y$  агента  $b$  зависит как от выполнения действия  $x_2$  агента  $a$ , так и от действия  $w_1$  агента  $d$ . Встречаются и более сложные виды обязательства, например, когда выполнение действия  $y_2$  агента  $b$  непосредственно зависит от выполнения действия  $z_2$  агента  $c$  и неявно зависит от действия  $y_1$  агента  $b$ .

Обязательство между двумя агентами является базисом, на основе которого можно описать различные варианты сложных взаимодействий между агентами по выполнению обязательств.

Расширим концепцию обязательства – внесем в обязательство временной параметр, это позволит проводить рассуждения о том, когда обязательство выполняется или нарушается, и возможна ли ситуация, когда оно невыполнимо.

**Временное обязательство** – обязательство агента перед другим агентом по выполнению действия с учетом временных ограничений. Временное обязательство представим в виде кортежа:

$$TC = \langle id, x, y, \varphi, t \rangle,$$

где  $id, x, y$  – такие же параметры, как и в исходном обязательстве;  $\varphi$  – действие, которое обязуется выполнить агент  $x$  для агента  $y$ ;  $t = \langle t_i, t_f \rangle$  – кортеж, описывающий временное ограничение на выполнение обязательства:  $t_i$  – момент времени начала выполнения действия, можно задать как интервал времени  $[t_{i1}, t_{i2}]$ , при этом  $t_{i1} \leq t_{i2}$ ;  $t_f$  – момент завершения выполнения действия, можно задать в виде интервала времени  $[t_{f1}, t_{f2}]$ , при этом  $t_{f1} \leq t_{f2}$ .

В соответствии с этим определением можно выделить различные варианты представления временного обязательства:

$TC = \langle id, x, y, \varphi, \langle null, t_f \rangle \rangle$  – задано точное время окончания действия. Временное обязательство с указанием времени завершения;

$TC = \langle id, x, y, \varphi, \langle null, [t_{f1}, t_{f2}] \rangle \rangle$  – действие должно быть выполнено в интервале от  $t_{f1}$  до  $t_{f2}$ .

Временное обязательство с указанием временного интервала завершения.

$TC = \langle id, x, y, \varphi, \langle t_i, null \rangle \rangle$  – задано точное время начала выполнения действия. Временное обязательство с указанием времени начала выполнения;

$TC = \langle id, x, y, \varphi, \langle [t_{i1}, t_{i2}], null \rangle \rangle$  – агент  $x$  должен начать выполнять действие в интервале от  $t_{i1}$  до  $t_{i2}$ . Временное обязательство с указанием временного интервала, в котором должно начаться выполнение действия;

$TC = \langle id, x, y, \varphi, \langle [t_{i1}, t_{i2}], [t_{f1}, t_{f2}] \rangle \rangle$  – самая строгая формулировка временного обязательства, задан интервал времени начала и конца действия. Временное обязательство с указанием временных интервалов, в котором должно начаться и завершиться выполнение.

Состояние временного обязательства динамически меняется со временем. Приведем список состояний соответствующего автомата временного обязательства:

*Unset* – агент кредитор не может заставить агента должника выполнить задачу, но он может подать запрос на временное обязательство. В случае принятия агентом должником запроса, создается временное обязательство;

*Active* – агент должник обязуется выполнить все задачи, запрашиваемые агентом кредитором. Состояние временного обязательства, в котором агент должник активно выполняет задачу агента кредитора;

*Fulfilled* – агент должник, выполнив задачу агента кредитора и при этом не нарушив времен-

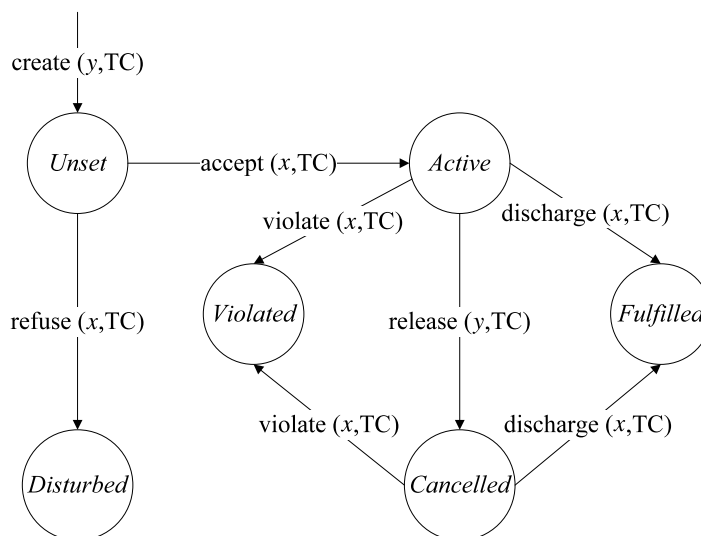


Рис. 2. Переходы между состояниями временных обязательств

ное ограничение, освобождается от своего временного обязательства;

*Violated* – в это состояние временное обязательство попадает, когда агент должник не выполняет задачу агента кредитора в заданное время;

*Cancelled* – временное обязательство было отменено агентом кредитором;

*Disturbed* – агент должник не согласился на выполнение временного обязательства.

Агентам, имеющим временные обязательства, необходимо задать набор операций, которые определяют связь между выполняемым действием и изменением состояния обязательства.

Список *операций временного обязательства*:

*create* ( $x, TC$ ) – создание временного обязательства, операция выполняется агентом должником;

*cancel* ( $x, TC$ ) – отмена агентом должником выполнения временного обязательства;

*release* ( $y, TC$ ) – отмена агентом кредитором выполнения временного обязательства;

*assign* ( $y, z, TC$ ) – замена агента кредитора временных обязательств  $s$  у на  $z$ ;

*violate* ( $x, TC$ ) – невыполнение агентом должником временного обязательства;

*delegate* ( $x, z, TC$ ) – замена агента должника  $x$  на  $z$ ;

*discharge* ( $x, TC$ ) – выполнение агентом должником временного обязательства;

*activate* ( $x, TC$ ) – запуск агентом должником действия, запрашиваемого агентом кредитором;

*accept* ( $y, TC$ ) – агент кредитор соглашается на создание обязательства.

Управление временным обязательством должно выполняться последовательно. Состояния временного обязательства являются взаимоисключающими. На рис. 2 представлены переходы между состояниями временных обязательств.

Для формализованного описания свойств системы часто используется некоторый логический язык, интерпретация формул которого производится на некоторой формальной модели системы. Наиболее простым логическим языком является пропозициональная логика, именуемая также *логикой высказываний* [3], она входит практически в любой формальный логический язык. Для *реактивных систем* необходимо описание переходов между состояниями для отображения взаимодействия с окружающей средой и откликов на внешние воздействия. Для описания последова-

тельно переходов между состояниями реактивной системы целесообразно использовать темпоральные логики. Это мощный инструмент для спецификации динамических систем, но некоторые свойства, связанные с описанием ограничений на время реакции, выразить в них достаточно сложно. Поэтому существует множество расширений темпоральной логики, в числе которых CTL, RTCTL, позволяющие в более удобном виде выражать подобные свойства. Например, логика RTCTL расширяет CTL ограниченным оператором  $\gamma U_{\leq t} \varphi$ , интерпретируемым как «не более чем через  $t$  шагов  $\varphi$ , а до тех пор  $\gamma$ » [4].

Опишем грамматику формального языка  $\mathcal{L}$  в форме Бэкуса–Наура (БНФ) [5], где  $T$  является начальным символом языка  $\mathcal{L}$ .

G1  $T ::= \sigma \mid C \mid Q$

G2  $C ::= TC(id, x, y, \varphi, P)$

G3  $P ::= \langle [t_{i1}, t_{i2}], [t_{f1}, t_{f2}] \rangle$

G4  $Q ::= activate(x, C) \mid discharge(x, C) \mid$

$\mid violate(x, C) \mid done(\varphi) \mid refuse(x, C) \mid release(y, C) \mid create(y, C)$

G5  $T ::= T \wedge T$  : Дизъюнкция

G6  $T ::= \neg T$  : Отрицание

G7  $T ::= T \vee T$  : Конъюнкция

G8  $T ::= AT$  : Квантор всеобщности

G9  $T ::= ET$  : Квантор существования

G10  $T_1, T_2 \in T \Rightarrow T ::= T_1 \cup T_2$  : Имеется состояние, в котором соблюдается второе свойство  $T_2$ , а до этого времени соблюдается  $T_1$

G11  $T_1, T_2 \in T \Rightarrow T ::= T_1 \cup_{\leq k} T_2$  : Существует точка  $k$ , от которой будет верно свойство  $T_2$ , а до тех пор соблюдается  $T_1$

G12  $T_1, T_2 \in T \Rightarrow T ::= T_1 \cup_{\geq k} T_2$

Перейдем к описанию семантики языка  $\mathcal{L}$ , для этого определим концепцию временного обязательства с помощью формальной модели, основанной на структуре Крипке. Моделью Крипке  $M$  над множеством атомарных высказываний  $AP$  назовем четверку  $M = (S, S_0, R, L)$ , в которой:

$S$  – конечное множество состояний;

$S_0 \subseteq S$  – множество начальных состояний;

$R \subseteq S \times S$  – отношение переходов, которое обязано быть тотальным, т. е. для каждого состояния  $s \in S$  должно существовать такое состояние  $s' \in S$ , что имеет место  $R(s, s')$ ;

$L : S \rightarrow 2^{AP}$  – функция, которая помечает каждое состояние множества атомарных высказываний, истинных в этом состоянии;

бесконечный путь в модели Крипке:  $\pi = \langle s_0, s_1, s_2 \dots \rangle$ , где  $s_i \in S$ ;

суффикс  $\pi^i$  пути  $\pi : \pi^i = \langle s_i, s_{i+1}, s_{i+2} \dots \rangle$ ;  
формула  $f$  выполняется на пути  $\pi$  модели  
Крипке  $M$ :  $M, \pi \models f$ .

Семантика формул языка  $\mathcal{L}$ :

$$R1 \quad M, s \models p \wedge q \Leftrightarrow M, s \models p \text{ and } M, s \models q.$$

$$R2 \quad M, s \models p \vee q \Leftrightarrow M, s \models p \text{ or } M, s \models q.$$

$$R3 \quad M, s \models \neg p \Leftrightarrow M, s \not\models p.$$

$$R4 \quad M, s \models Ap \Leftrightarrow \forall s \in S : M, s \models p.$$

$$R5 \quad M, s \models Ep \Leftrightarrow \exists s \in S : M, s \models p.$$

$$R6 \quad M, s \models p \cup q \Leftrightarrow [\exists s^i \in S / s \preceq s^i : M, s^i \models p] \vee [\exists s^j \in S / s \preceq s^j : M, s^j \models q].$$

$$R7 \quad M, s \models ApU^{\leq n} q \Leftrightarrow [\exists s^n \in S / s \preceq s^n : M, s^n \models q] \vee [\forall s^i / i \leq n \wedge s \preceq s^i : M, s^i \models p].$$

$$R8 \quad M, s \models AG^{\leq n} p \Leftrightarrow \forall s^n \in S \wedge \forall i \leq n : M, s^i \models p.$$

$$R9 \quad M, s \models AF^{\leq n} p \Leftrightarrow \forall s^n \in S \wedge \exists i \leq n : M, s^i \models p.$$

$$R10 \quad M, s \models EpU^{\leq n} q \Leftrightarrow [\exists s^n \in S / s \preceq s^n : M, s^n \models q] \vee [\exists s^i / i \leq n \wedge s \preceq s^i : M, s^i \models p].$$

$$R11 \quad M, s \models AG^{\leq n} p \Leftrightarrow \forall s^n \in S \wedge \forall i \leq n : M, s^i \models p.$$

$$R12 \quad M, s \models AF^{\leq n} p \Leftrightarrow \exists s^n \in S \wedge \exists i \leq n : M, s^i \models p.$$

$$R13 \quad M, s \models ApU^{\geq n} q \Leftrightarrow [\exists s^n \in S / s^n \preceq s : M, s^n \models q] \vee [\forall s^i / i \geq n \wedge s^n \preceq s^i : M, s^i \models p].$$

$$R14 \quad M, s \models EpU^{\geq n} q \Leftrightarrow [\exists s^n \in S / s^n \preceq s : M, s^n \models q] \vee [\exists s^i / i \geq n \wedge s^n \preceq s^i : M, s^i \models p].$$

$$R15 \quad M, s \models \forall x f(x) \Leftrightarrow \forall n \in N : M, s \models f(n).$$

$$R16 \quad M, s \models \forall (x \leq a) f(x) \Leftrightarrow \forall n \in N \wedge n \leq a : M, s \models f(n).$$

$$R17 \quad M, s \models \exists x f(x) \Leftrightarrow \exists n \in N : M, s \models f(n).$$

$$R18 \quad M, s \models \exists (x \leq a) f(x) \Leftrightarrow \forall n \in N \wedge n \leq a : M, s \models f(n).$$

Приведем формальные определения операций, проводимые над временным обязательством с использованием грамматических формул, описанных выше.

Семантическое правило R19 демонстрирует создание временного обязательства в модели  $M$ , с учетом временных ограничений, определяемых кортежем  $\langle [t_{i1}, t_{i2}] [t_{f1}, t_{f2}] \rangle$ . Временное обязательство становится активным в промежутке времени от  $t_{i1}$  до  $t_{i2}$  и завершается в промежутке времени между  $t_{f1}$  и  $t_{f2}$ :

$$R19 \quad M, s \models create(x, tc(id, x, y, \phi, \langle [t_{i1}, t_{i2}] \times [t_{f1}, t_{f2}] \rangle)) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow M, s \models tc(id, x, y, \phi, \langle [t_{i1}, t_{i2}] [t_{f1}, t_{f2}] \rangle) \wedge$$

$$\wedge M, s \models AG^{t_{i1}} \neg activate(x, tc) \wedge M, s \models$$

$$\models AF^{\leq t_{i2}} activate(x, tc) \wedge$$

$$\wedge M, s \models AG^{t_{f1}} \neg discharge(x, tc) \wedge M, s \models$$

$$\models AF^{\leq t_{f2}} discharge(x, tc) \wedge$$

$$\wedge s^{t_{i2}} \prec s^{t_{f1}} \wedge \forall x_1, y_1, \phi_1 : M, s \not\models tc(id, x_1, y_1, \phi_1, T).$$

Правило R20 (*release*) в модели  $M$  определя-

Таблица 1

Create – Request

Операция	Create
Краткое описание акта	Request (запрос) – отправитель просит приемник выполнить действие. В содержании сообщения описывается действие на языке, который понимает приемник. Важной особенностью является создание композитных разговоров между агентами
Формальная модель	$\langle i, request(j, a) \rangle$ $FP : FP(a)[i \setminus j] \wedge B_i Agent(j, a) \wedge \neg B_i I_j Done(a)$ $RE : Done(a)$

Таблица 2

Accept – Agree

Операция	Accept
Краткое описание акта	Agree (соглашаться) – агент соглашается в будущем выполнить действие, описанное в запросе (request) от другого агента
Формальная модель	$\langle i, agree(j, \langle i, act \rangle, \phi) \rangle \equiv \langle i, inform(j, I_i, Done(\langle i, act \rangle, \phi)) \rangle$ $FP : B_i a \wedge \neg B_i (Bif_j a \vee Uif_j a)$ $RE : B_j a$

ет отмену обязательства агентом кредитором:

$$R20 \ M, s \models \text{release}(y, C) \Rightarrow M, s \models AG\neg C.$$

Правило R21 в модели  $M$  определяет отмену обязательства агентом должником:

$$R21 \ M, s \models \text{refuse}(x, C) \Rightarrow M, s \models AG\neg C.$$

Правило R22 описывает завершение выполнения временного обязательства:

$$R22 \ M, s \models \text{discharge}(x, C) \Rightarrow M, s \models$$

$$\models AG(\text{active}(x, C) \wedge \text{done}(\varphi)U^{\leq k}\neg C).$$

Правило R23 учитывает нарушение временного обязательства, которое возникает в двух случаях: временное обязательство не было вовремя начато или завершено

$$R23 \ M, s \models \text{violate}(x, tc(id, x, y, \varphi([t_{i1}, t_{i2}], [t_{f1}, t_{f2}]))) \Rightarrow$$

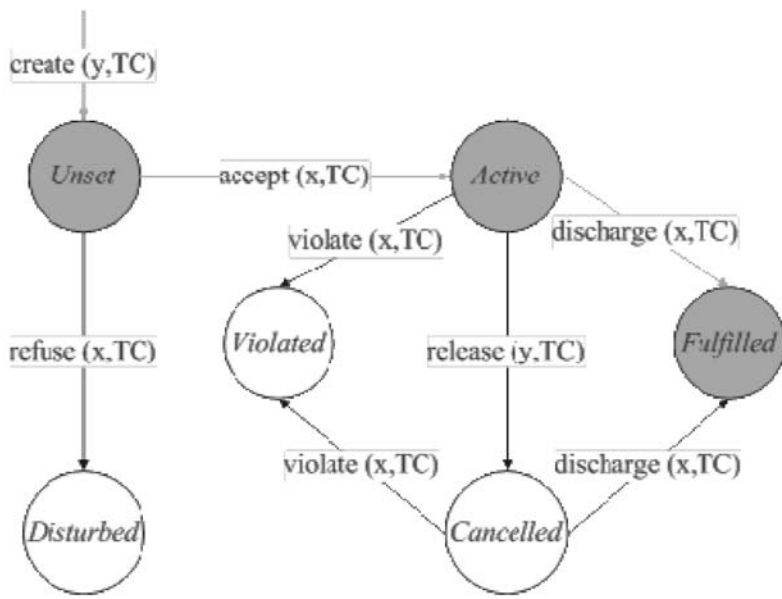


Рис. 3. Агент должник вовремя выполнил временное обязательство

$$\Rightarrow M, s \models A \left[ \begin{array}{l} activate(x, tc(id, x, y, \varphi, \langle [t_{i1}, t_{i2}] [t_{f1}, t_{f2}] \rangle)) U^{\leq t'} \\ \neg discharge(x, tc(id, x, y, \varphi, \langle [t_{i1}, t_{i2}] [t_{f1}, t_{f2}] \rangle)) \wedge s^{t_{f1}} \preceq s^{t'} \preceq s^{t_{f2}} \end{array} \right] \vee$$

$$\vee M, s \models A \left[ \begin{array}{l} create(x, tc(id, x, y, \varphi, \langle [t_{i1}, t_{i2}] [t_{f1}, t_{f2}] \rangle)) U^{\leq t'} \\ \neg activate(x, tc(id, x, y, \varphi, \langle [t_{i1}, t_{i2}] [t_{f1}, t_{f2}] \rangle)) \wedge s^{t_{i1}} \preceq s^{t'} \preceq s^{t_{i2}} \end{array} \right].$$

Определим правило, активизирующее временное обязательство, созданное ранее. Временное обязательство не должно быть нарушенным, отмененным или завершенным:

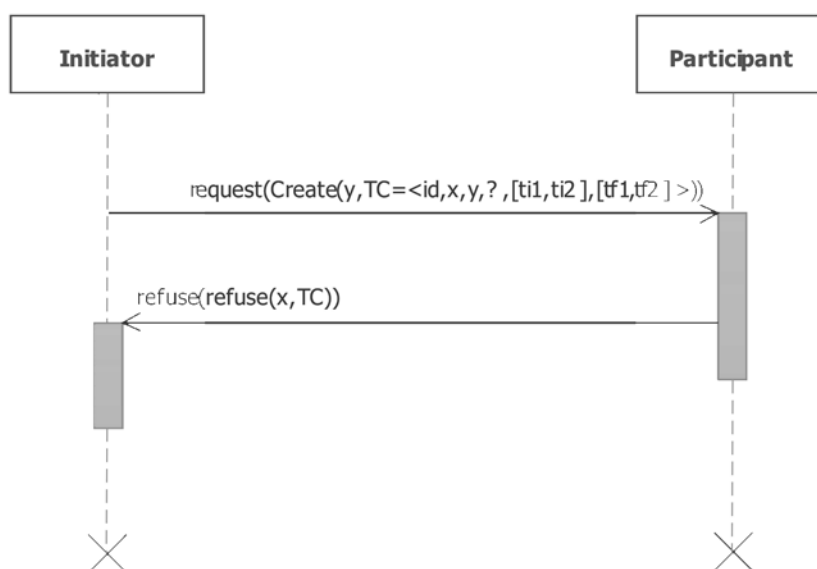
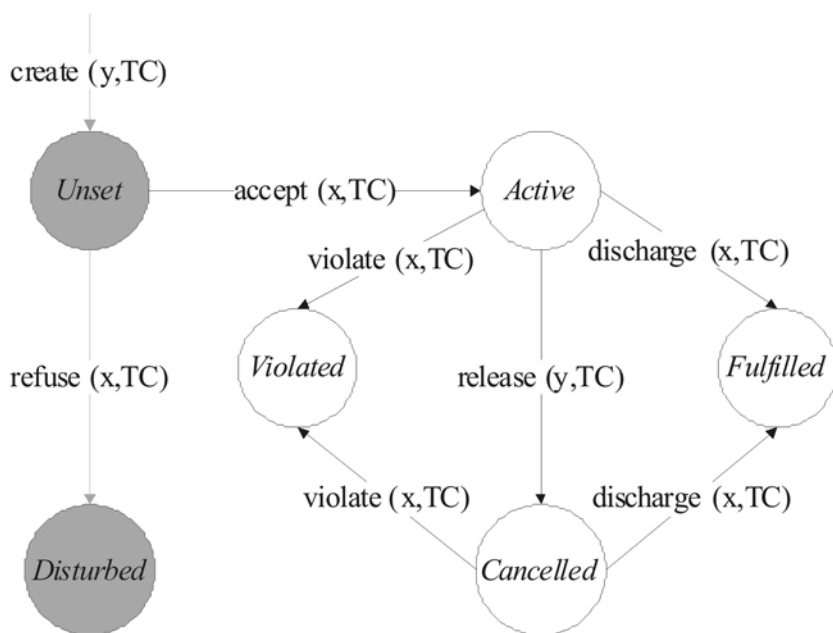


Рис. 4. Посылка агентом кредитором запроса (request), на который должник ответил отказом (refuse)

$R24 M, s \models activate(x, C) \Rightarrow Acreate(x, C)U^{st}$   
 $(\neg violate(x, C) \wedge \neg discharge(x, C) \wedge \neg cancel(x, C)).$

Каждой операции временного обязательства можно поставить в соответствие коммуникативный акт из спецификации FIPA. Например, операция создания (*create*) временного обязательства соответствует коммуникативному акту запроса – *request*. Пара примеров таких соответствий приведена в табл. 1 и 2, остальные устанавливаются аналогично.

На основе введенной концепции временного обязательства можно описать протокол взаимодействия временного обязательства, позволяющий одному агенту заставить другого агента выполнить действие в заданных временных ограничениях. При изменении состояния временного обязательства происходит обмен сообщениями между агентами.

В качестве иллюстрации фрагментов протокола взаимодействия приведем примеры ситуаций с различными исходами на рис. 3 и 4.

На рис. 4 агент кредитор подает запрос *request* ( $\varphi, [t_{i1}, t_{i2}] [t_{f1}, t_{f2}]$ ) на создание временного обязательства. В этом запросе прописывается запрашиваемое действие  $\varphi$  и временные интервалы, в которые нужно уложиться.

Таким образом, в статье представлена модель на основе концепции временного обязательства.

Составлена семантика языка временного обязательства, позволяющая исследовать выполнимость обязательства, условия его выполнимости, выявить ситуации, в которых реализация обязательства невозможна.

Выбраны коммуникативные акты из спецификации FIPA, соответствующие каждой операции временного обязательства, и произведено расширение выбранных коммуникативных актов за счет временного фактора.

Работа выполнена в рамках НИР № 01.2.006.08701 гос. регистрации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Castelfranchi, С.** Commitments: From individual intentions to groups and organizations [Text] / С. Castelfranchi // In: Proc. of the AAAI-93 Workshop on AI and Theories of Groups and Organizations: Conceptual and Empirical Research, 1993.
2. **Ferber, J.** Les systems multi-agents [Text] / J. Ferber // Vers une intelligence collective. –Paris: InterEditions, 1995.
3. **Кларк, Э.М. мл.** Верификация моделей программ: Model Checking [Текст] / Э.М. Кларк мл.,

- О. Грамберг, Д. Пелед. –М.: МЦНМО, 2002. –416 с.
4. **Бугайченко, Д.Ю.** Разработка и реализация методов формально-логической спецификации самонастраивающихся мультиагентных систем с временными ограничениями [Текст] / Д.Ю. Бугайченко. –2007.
5. **Паронджанов, С.С.** Модели, методы и программные средства организации взаимодействия интеллектуальных агентов [Текст] / С.С. Паронджанов. –2008. –146 с.

#### REFERENCES

1. Castelfranchi С. Commitments: From individual intentions to groups and organizations / In: Proc. of the AAAI-93 Workshop on AI and Theories of Groups and Organizations: Conceptual and Empirical Research, 1993.
2. Ferber J. Les systems multi-agents. Vers une intelligence collective. – Paris: InterEditions, 1995.
3. Klark E.M. Ml., Gramberg O., Peled D. Verifikatsiia modelei programm: Model Checking. – Moscow:

- MTSNMO, 2002. – 416 s. (rus)
4. Bugaichenko D.IU. Razrabotka i realizatsiia metodov formal'no-logicheskoi spetsifikatsii samonastraivaiushchikhsia mul'tiagentnykh sistem s vremennymi ogranicheniiami. –St. Petersburg: SPbGU, 2007. –259 s. (rus)
5. Parondzhanov S.S. Modeli, metody i programmnye sredstva organizatsii vzaimodeistviia intellektual'nykh agentov. – Moscow: MGIFI, 2008. – 185 s. (rus)