

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ, ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ

УДК 556.18:626

### ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ РЫНКА РАЗРЕШЕНИЙ НА СБРОС ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В ВОДОЁМЫ<sup>1</sup>

© 2012 г. В. И. Данилов-Данильян, И. Л. Хранович

*Институт водных проблем РАН*

*119991 Москва, ул. Губкина, 3*

*E-mail: vidd@aqua.laser.ru*

Поступила в редакцию 11.10.2010 г.

Предложен подход к формированию рынка разрешений на сброс загрязняющих веществ в водоемы, в котором учитываются особенности использования водных ресурсов и управления их качеством в рамках пространственно распределенной водохозяйственной системы. Рынок функционирует в стохастических условиях формирования качества вод. В предложенном подходе к формированию рынка “ведущими” выступают предельно допустимые сбросы, играющие роль ориентиров масс примесей. Массы сбросов, производимых при различных реализациях стохастических условий, являются “ведомыми”.

*Ключевые слова:* водохозяйственная система, водные ресурсы, примеси, качество вод, предельно допустимые сбросы, рынок прав на сбросы, стохастические условия.

#### ПРОБЛЕМА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЙ НА СБРОС

Водохозяйственные системы (ВХС) объединяют источники водных ресурсов, средства их доставки, пользователей, средства управления их режимом и качеством для удовлетворения хозяйственных нужд, а также решения социальных и экологических проблем, связанных с использованием водных ресурсов. Источники водных ресурсов одновременно служат приемниками стоков загрязненных вод промышленности, коммунального и сельского хозяйства – это обуславливает ухудшение качества природных вод, проявляющееся в изменении их химического состава и деградации экосистем водных объектов и прилегающих территорий. Основная причина ухудшения качества природных вод – превышение массами загрязняющих веществ (ЗВ), сбрасываемых в водные объекты, предельных нагрузок, при которых химические и биологические качества водной среды соответствуют требованиям водопользователей не нарушают природные механизмы воспроизводства водных ресурсов. Ограничение дальнейшего ухудшения качества водной среды (и в перспективе его улучшения) потребовало введения ограничений нагрузок на водные объекты. Попыткой формализации таких ограничений стало введение понятия предельно допустимого сброса (ПДС), под которым понимается макси-

мально допустимая масса примесей в сточных водах пользователя.

В определении, сформулированном в [2], ПДС понимаются как “жесткие” ограничения. Однако в силу заведомой нецелесообразности, а нередко и невозможности их выполнения во всех ситуациях функционирования ВХС как природно-технического комплекса ПДС на практике оказываются ограничениями “мягкими”. Они играют роль ориентиров (подробнее об ориентирах как виртуальных ресурсах [4].), руководствуясь ими можно выбрать такие технологии использования водных ресурсов, параметры и режимы работы очистных сооружений, которые в меру возможности соответствуют целям введения ПДС, будучи на самом деле компромиссом этих целей с иными задачами ВХС.

Издержки, которые несет водопользователь при отводе от него загрязненных вод, как правило, не оправдывают его затрат на альтернативный вариант – их очистку. Эффект от улучшения качества воды, отводимой от одних пользователей, проявляется у других пользователей и приводит к улучшению экологической обстановки в регионе. От улучшения качества водных ресурсов выигрывает общество в целом. ПДС – индивидуальные характеристики пользователей. В совокупности они должны обеспечивать требуемое ограничение нагрузок на водные объект в целом. Их применение оправдывается функционированием всей ВХС с учетом взаимного влияния ее элементов. При этом предполагается существование органов управле-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 11-06-0002).

ния ВХС, которые на основании знаний о водных объектах, а также данных о возможностях и предпочтениях пользователей добиваются требуемого качества водных ресурсов, воздействуя на пользователей административными средствами и экономическими стимулами.

ПДС назначаются пользователям на определенный срок (например, на 5–10 лет), в течение которого, как правило, водохозяйственная обстановка успевает измениться. Появляются новые предприятия-пользователи водных ресурсов, и закрываются ранее функционировавшие. Развивается производство, меняются технологии использования водных ресурсов и очистки сточных вод. Возникает проблема перераспределения разрешений на сброс ЗВ. Решение этой проблемы видится в создании рынка разрешений, участники которого обладают правом самостоятельно выбирать предпочтительные варианты своего поведения. Они могут либо обеспечить непревышение ПДС изменением технологии использования водных ресурсов, строительством и реконструкцией очистных сооружений, либо приобрести право на сброс у других пользователей, которым выгодно такое право продать, т.е. получить разрешение на сброс определенного количества примесей в единицах массы ЗВ за счет другого пользователя. При этом не могут быть превышены допустимые уровни загрязнения водоемов.

### ОСОБЕННОСТИ РЫНКА РАЗРЕШЕНИЙ НА СБРОС

Специфика рынка разрешений на сброс ЗВ порождается особенностями управления качеством водных ресурсов и их использованием. Качество воды в водоемах формируется под влиянием источников ЗВ пространственно распределенной системы – ВХС, элементы которой связаны сетью с потоками в ней воды и примесей. В очистных сооружениях чистятся индивидуально подобранные комплексы ЗВ с функционально взаимосвязанными степенями очистки различных примесей. Очистные комплексы продаются. В силу индивидуальности комплексов и состава ЗВ, подлежащих очистке, а также из-за влияния сети покупатель может использовать их лишь частично. На функционирование рынка налагают отпечаток стохастические условия формирования качества вод, обусловленные вероятностной природой основного водного ресурса – речного стока и потребностями некоторых пользователей.

При анализе возможностей формирования рынка разрешений (квот) на сброс ЗВ в водоемы использованы идеи и опыт формирования и функционирования рынка выбросов в воздушную среду [5, 6]. Выделяются бабл-принцип (принцип пузыря) и система определения масс перераспределяемых сбросов, минимизирующих суммарные затраты пользователей. Бабл-принцип рассматри-

вает все предприятия, сбрасывающие ЗВ в водные объекты некоторого бассейна (региона), как единый комплексный источник загрязнения. Эти предприятия могут обмениваться квотами на сброс так, чтобы масса сбросов комплексного источника не превышала разрешенного суммарного сброса всех предприятий региона. Определение масс перераспределенных сбросов производится также с использованием математической модели, в которой учитываются коэффициенты влияния сбросов источников, расположенных вдоль реки, на качество воды в контрольных створах. В этой модели ЗВ представлены одной примесью.

В данной работе рассматривается формирование такого рынка прав на сбросы ЗВ в водные объекты, когда вначале назначаются ПДС, играющие роль разрешений на сбросы, с последующей торговлей ими. Затраты на совершение сделок и организацию рынка (транзакционные издержки) полагаются незначительными и не учитываются. Сбросы ЗВ, поступающие в водные объекты от водопользователей, содержат конечное множество видов примесей. Наборы ЗВ пользователей индивидуальны.

Сделки на рынке разрешений на сбросы ЗВ могут осуществляться при любых исходных величинах ПДС. Но какие бы ни были первоначальные значения ПДС, они должны удовлетворять требованиям, отражающим особенности функционирования пользователей, в основном связанных с охраной водной среды и прилегающих территорий, таких как предприятия питьевого водоснабжения, рыбного хозяйства, рекреации, санитарного благополучия водоемов и т.п. В данной работе требования к качеству водных ресурсов представлены как ограничения на массы ЗВ в водных объектах. Функционирование ВХС рассматривается в статической постановке. Распределение водных ресурсов предполагается заданным. Стохастические условия функционирования представлены конечным множеством  $\Omega$  возможных реализаций  $\omega$ .

ВХС изображается сетью  $\Gamma(J, S)$ , отражающей структуру и параметры системы, с разнородными потоками в дугах  $y_{sl}^0$ , соответствующими потокам примесей, присутствующих в водных ресурсах ( $l$ -й вид примеси). Множество вершин  $J$  соответствует выделенным створам ВХС. Множество дуг изображает водохранилища, участки русел рек и каналов.

Потоки примесей на входах дуг  $y_{sl}^0$  включают, наряду с исходными потоками  $y_{sl}^{00}$ , приращения  $\delta_{sl}^0$ , обусловленные увеличением ( $\delta_{sl}^0 > 0$ ) или уменьшением ( $\delta_{sl}^0 < 0$ ) масс ЗВ в водоемах при передаче разрешений на сброс. В дугах сети происходит преобразование потоков, которые соответствуют переносу и трансформации примесей в водных объектах. Сложные процессы этих преоб-

разований аппроксимируются линейными зависимостями типа Стритера–Фелпса [1, 9] и описываются уравнениями

$$y_{sl}^{k\omega} = y_{sl}^{k\omega 0} + \delta_{sl}^{k\omega} = \sum_{\gamma \in L} A_s^{\gamma l \omega} y_{s\gamma}^{\omega} = \sum_{\gamma \in L} A_s^{\gamma l \omega} (y_{s\gamma}^{\omega 0} + \delta_{s\gamma}^{\omega}), \quad s \in S, \quad \omega \in \Omega, \quad (1)$$

где  $y_{sl}^{k\omega}$  – поток примеси на выходе дуги,  $A_s^{\gamma l \omega}$  – неотрицательные коэффициенты, характеризующие взаимное влияние примесей и образующие квадратную матрицу  $A_s^{\omega} = \{A_s^{\gamma l \omega} \mid \gamma, l \in L\}$  трансформаций веществ в водоеме.

Уравнения (1) имеют место также при  $\delta_{sl}^{\omega} = 0$  (до передачи разрешений на сброс ЗВ). В этом случае они принимают вид

$$y_{sl}^{k\omega 0} = \sum_{\gamma \in L} A_s^{\gamma l \omega} y_{s\gamma}^{\omega 0}, \quad s \in S, \quad \omega \in \Omega \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует, что приращения потоков примесей на входах и выходах дуг связаны соотношениями

$$\delta_{sl}^{k\omega} = \sum_{\gamma \in L} A_s^{\gamma l \omega} \delta_{s\gamma}^{\omega}. \quad (3)$$

Требования к качеству водных ресурсов порождают диапазоны допустимых значений потоков в дугах сети. Множество видов примесей  $L$  делится по группам лимитирующих показателей вредности (например, санитарно-токсикологические, общесанитарные, органолептические ЗВ и др.) на подмножества  $L_\gamma$ , которые могут иметь непустое пересечение, их объединение  $\bigcup L_\gamma = L$ . Примеси множеств  $L_\gamma$  образуют  $\gamma$ -е дозы загрязнений, величины которых не должны превышать единицы [8]. Это означает, что потоки на входах дуг должны удовлетворять неравенствам

$$\sum_{l \in L_\gamma} d_{sl} y_{sl}^{\omega} = \sum_{l \in L_\gamma} d_{sl} [y_{sl}^{\omega 0} + \delta_{sl}^{\omega}] \leq x_s^{\omega}, \quad (4)$$

где  $d_{sl}$  – величина, обратная ПДК;  $x_s^{\omega}$  – объем водных ресурсов в водоеме, его значения фиксированные. Требования к качеству воды, возвращаемой в ВХС, которым должны удовлетворять потоки на выходе дуг, задаются такими же неравенствами

$$\sum_{l \in L_\gamma} d_{sl} y_{sl}^{k\omega} = \sum_{l \in L_\gamma} d_{sl} [y_{sl}^{k\omega 0} + \delta_{sl}^{k\omega}] \leq x_s^{k\omega}. \quad (5)$$

Пользователи с очистными сооружениями образуют множество  $H$  и изображаются в виде источников, потоки которых  $m_h^{\omega} = \{m_{hl}^{\omega} \mid l \in L\}$  соответствуют массам ЗВ, поступающих в ВХС. Значения  $m_h^{\omega} = m_h^{\omega 0} + \Delta_h^{\omega}, h \in H$ , где  $m_h^{\omega 0}$  – начальные потоки,  $\Delta_h^{\omega} = \{\Delta_{hl}^{\omega} \mid l \in L\}$  – отклонения от них, ко-

торые могут варьироваться в зависимости от глубины очистки. Величины потоков  $m_{hl}^{\omega}$  ограничены сверху максимально возможной величиной сбросов  $m_{hl}^{\omega}$ , снизу – нулем в силу неотрицательности значений масс примесей.

$$0 \leq m_{hl}^{\omega} = m_{hl}^{\omega 0} + \Delta_{hl}^{\omega} \leq \bar{m}_{hl}^{\omega}. \quad (6)$$

Исходные значения ПДС  $M_h^0 = \{M_{hl}^0 \mid l \in L\}$  в процессе обмена на формируемом рынке сбросов преобразуются в  $M_h = M_h^0 + q_h$ , где итоги купли и продажи квот  $q_h = \{q_{hl} \mid l \in L\}$  могут быть как положительными, так и отрицательными.

Значения  $M_{hl}$  ограничены сверху величиной  $\bar{M}_{hl} = \max_{\omega \in \Omega} \bar{m}_{hl}^{\omega}$ , так как нет смысла назначать ПДС больше наибольшего возможного значения сброса, определяемого технологией использования водных ресурсов

$$0 \leq M_{hl} = M_{hl}^0 + q_h \leq \bar{M}_{hl}. \quad (7)$$

Состав примесей  $m_h^{\omega}$  в сбросах пользователей  $m_h^{\omega}$  и их ПДС для каждого пользователя индивидуальны. Состав примесей характеризуется коэффициентами  $\alpha_{hl}$ , которые показывают долю  $l$ -й примеси в массе сброса  $h$ -го пользователя

$$m_{hl}^{\omega} = \alpha_{hl} |m_h^{\omega}|, \quad M_{hl} = \alpha_{hl} |M_h|, \quad (8)$$

где  $|m_h^{\omega}| = \sum_{l \in L} m_{hl}^{\omega}, |M_h| = \sum_{l \in L} M_{hl}$ .

Так как в сбросах разных пользователей содержатся различные составы примесей, то  $h$ -й пользователь, купивший разрешение (квоту) на сброс  $q_h^n$  у  $n$ -го пользователя, может воспользоваться им частично. Возможная для использования доля купленного разрешения определяется наименьшим соотношением примесей в составе сбросов продавца и покупателя

$$\varepsilon_n^h = \min_{l \in L} \frac{\alpha_{hl}}{\alpha_{nl}}. \quad (9)$$

Коэффициенты  $\varepsilon_n^h$  преобразования приобретенных разрешений на сброс ЗВ в увеличение ПДС образуют квадратную матрицу коэффициентов приращения квот. Ее размерность соответствует числу пользователей с очистными сооружениями.

Приобретаемые приращения на сброс ЗВ образуют сумму

$$q_h^+ = \sum_{n \in H} \varepsilon_n^h q_n^{h+}, \quad (10)$$

продаваемые –

$$q_h^- = \sum_{n \in H} q_n^{h-}. \quad (11)$$

Приращения разрешений на сброс ЗВ пользователей формируются из продаваемых и приобретаемых квот в виде

$$q_h = q_h^+ - q_h^-. \quad (12)$$

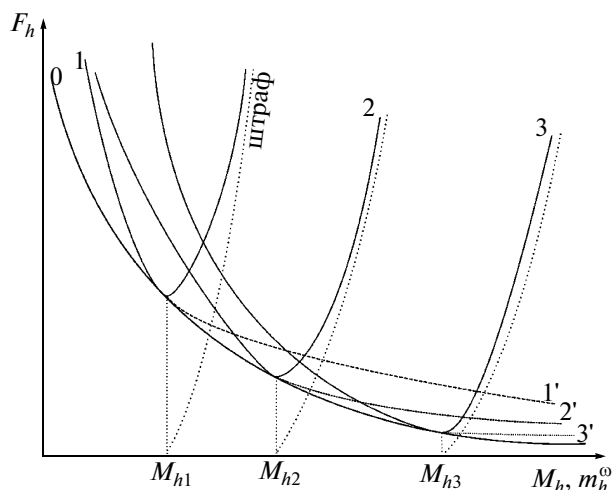


Рис 1. Зависимость затрат на очистку сточных вод от масс сбрасываемых примесей.

Закон сохранения масс примесей представлен системой уравнений неразрывности потоков в вершинах сети

$$\sum_{s \in S_i^+} y_{sl}^{k\omega} - \sum_{s \in S_i^-} y_{sl}^{\omega} + \sum_{h \in H_i} m_{hl}^{\omega} + b_{il}^{\omega} = 0, \quad (13)$$

где  $S_i^+$  — множество дуг, заходящих в  $i$ -ю вершину;  $S_i^-$  — множество дуг, исходящих из нее;  $b_{il}^{\omega}$  — поток  $l$ -го вида, поступающий в  $i$ -ю вершину;  $H_i$  — множество источников, потоки которых изображают ЗВ, отводимые пользователями с очистными сооружениями в  $i$ -ю вершину. В терминах начального распределения система (13) при подстановке уравнений (1) принимает вид

$$\sum_{s \in S_i^+} (y_{sl}^{k\omega 0} + \delta_{sl}^{k\omega}) - \sum_{s \in S_i^-} (y_{sl}^{\omega 0} + \delta_{sl}^{\omega}) + b_{il}^{\omega} + \sum_{h \in H_i} (m_{hl}^{\omega 0} + \Delta_{hl}^{\omega}) = 0. \quad (14)$$

Система уравнений (14), соответствующая закону сохранения масс примесей, при начальном распределении ЗВ в водных объектах, при которых  $\delta_{sl}^{\omega}, \delta_{sl}^{k\omega}$  и  $\Delta_{hl}^{\omega}$  равны нулю, преобразуется в систему

$$\sum_{s \in S_i^+} y_{sl}^{k\omega 0} - \sum_{s \in S_i^-} y_{sl}^{\omega 0} + \sum_{h \in H_i} m_{hl}^{\omega 0} + b_{il}^{\omega} = 0. \quad (15)$$

Системы уравнений (14) и (15) совместно порождают условия, которым должны удовлетворять вариации потоков, изображающих в сети  $\Gamma(J, S)$  приращения масс примесей при изменении масс сбросов ЗВ в водные объекты

$$\sum_{s \in S_i^+} \delta_{sl}^{k\omega} - \sum_{s \in S_i^-} \delta_{sl}^{\omega} + \sum_{h \in H_i} \Delta_{hl}^{\omega} = 0. \quad (16)$$

## ЦЕЛЕВЫЕ ФУНКЦИИ И ИХ ТРАНСФОРМАЦИИ

Затраты на очистку стоков от содержащихся в них примесей  $f_h(M_h, m_h^{\omega})$  зависят как от технологий очистки, ориентированных на достижение ПДС, которым в модели соответствуют  $M_h$ , так и от режимов работы очистных сооружений  $m_h^{\omega}$ .

Функции  $f_h(M_h, m_h^{\omega})$  выпуклы по каждому из переменных  $M_h$  и  $m_h^{\omega}$  в силу закона убывающей эффективности, в соответствии с которым с ростом степени очистки стоков растут затраты на их доочистку [7]. В общем случае нельзя гарантировать выпуклость по их совокупности. Однако производственные функции очистных сооружений всех пользователей Верхневолжской ВХС, построенные К.И. Софроновой, оказались выпуклыми по совокупности переменных  $M_h$  и  $m_h^{\omega}$  [3], и этого следовало ожидать исходя из экономических соображений. В данной работе предполагается, что функции  $f_h(M_h, m_h^{\omega})$  такими свойствами обладают.

Вид зависимостей производственных функций очистных сооружений иллюстрирует рис. 1, на котором показано параметрическое представление функции двух переменных  $f_h(M_h, m_h^{\omega})$  в виде семейства функций одного переменного  $m_h^{\omega}$ , зависящих от параметра  $M_h$ . На рис. 1 он принимает дискретные значения  $M_{h1}, M_{h2}$ ; кривые 1, 2, ... им соответствуют. Кривая 0 — нижняя огибающая семейства кривых  $f_h(M_{hi}, m_h^{\omega})$ ,  $i = 1, 2, \dots$ , — описывает работу очистных сооружений в оптимальном режиме, в котором  $m_h^{\omega} = M_h$ . Во всех остальных случаях ( $m_h^{\omega} \neq M_h$ ) затраты больше (кривые  $f_h(M_{hi}, m_h^{\omega})$  на рис. 1 выше кривой 0). Выше не только возрастающие при  $m_h^{\omega} > M_h$  ветви кривых 1, 2, ..., которые показывают суммарный рост затрат на очистку стоков и штрафов за превышение ПДС, но и ветви этих кривых, показывающие уменьшение затрат на очистку при увеличении сбросов из-за снижения степени очистки. Для одного и того же значения  $|m_h^{\omega} - M_h|$  при  $m_h^{\omega} < M_h$  отличие от кривой 0 больше, чем при  $m_h^{\omega} > M_h$ , что соответствует большим значениям на доочистку, как правило, значительно большим, чем выигрыш от уменьшения степени очистки.

Затраты  $F_h(M, m_h^{\omega})$  пользователей, связанные с функционированием очистных сооружений, включают затраты  $f_h^{\omega}(M_h, m_h^{\omega})$  на собственно очистку стоков от ЗВ, штрафы  $\varepsilon_h(M_h, m_h^{\omega})$  за превышение величин сбросов значений ПДС

$$F_h(M_h, m_h^{\omega}) = f(M_h, m_h^{\omega}) + \varepsilon_h(M_h, m_h^{\omega}). \quad (17)$$

При совершении сделок купли-продажи на рынке квот на сброс ЗВ в целевые функции пользователей включаются также затраты  $C_h^+ = \sum_{n \in H} c_n^h q_n^{h+}$  на приобретение разрешений на сброс ЗВ и выигрыш  $C_h^- = \sum_{n \in H} c_n^h q_n^{h-}$  от продажи части квот

$$F_h(M_h, m_h^{\circ}) = f(M_h^0 + q_h, m_h^{\circ 0} + \Delta_h^{\circ}) + \varepsilon_h(M_h^0 + q_h, m_h^{\circ 0} + \Delta_h^{\circ}) + C_h^+ - C_h^- \quad (18)$$

Здесь  $c_n^+$  и  $c_n^h$  – нормативы стоимостей покупок и продаж разрешений на сброс ЗВ. Формулой (18) описывается трансформация целевых функций пользователей водных ресурсов, которые могут совершать сделки с несколькими участниками рынка и выступать одновременно как продавцы и как покупатели разрешений на сброс ЗВ.

Приращения значений функций  $F_h(M, m_h) = M F_h(M, m_h^{\circ})$ , где  $M$  – символ математического ожидания,

$$\Delta F_h(M, m_h) = F_h(M, m_h) - F_h(M^0, m_h^0) \quad (19)$$

при совершении актов купли-продажи отрицательные. В противном случае обмен разрешениями на сброс ЗВ не производится.

Вид функций  $F_h(M_h, m_h^{\circ})$  иллюстрирует рис. 2, на котором показана трансформация функции  $F_h(M_h, m_h^{\circ})$  продавца ( $C_h^- = 0$ ) (2а) и приведен вид преобразования функций  $F_h(M_h, m_h^{\circ})$  покупателя ( $C_h^+ = 0$ ) (2б). Как видно на рисунках, затраты, связанные со штрафами, – строго выпуклые возрастающие с ростом сбросов выше ПДС функции  $\varepsilon_h(M_h, m_h^{\circ})$ . Причем их рост значительно превышает снижение затрат на очистку стоков при  $m_h^{\circ} > M_h$ . При  $m_h^{\circ} = M_h$  функции  $\varepsilon_h(M_h, m_h^{\circ})$  равны нулю. Указанная особенность штрафных санкций заставляет пользователей избегать превышения ПДС. Вид зависимостей затрат  $F_h(M_h, m_h^{\circ})$  на очистку стоков от ЗВ, приведенных на рис. 2, показывает, что продавец выигрывает за счет уменьшения сбросов. Это случается при переходе к более прогрессивным технологиям использования водных ресурсов и очистки сточных вод. Типичный вид трансформации функций  $F_h(M_h, m_h^{\circ})$  покупателя, показанный на рис. 2б, демонстрирует его выигрыш за счет увеличения сбросов (уменьшения степени очистки), что, как правило, происходит при использовании устаревших технологий.

### ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ РЫНКА

Продавцы и покупатели договариваются друг с другом о ценах, по которым приобретаются разрешения на сброс ЗВ, и их объемах. При этом мо-

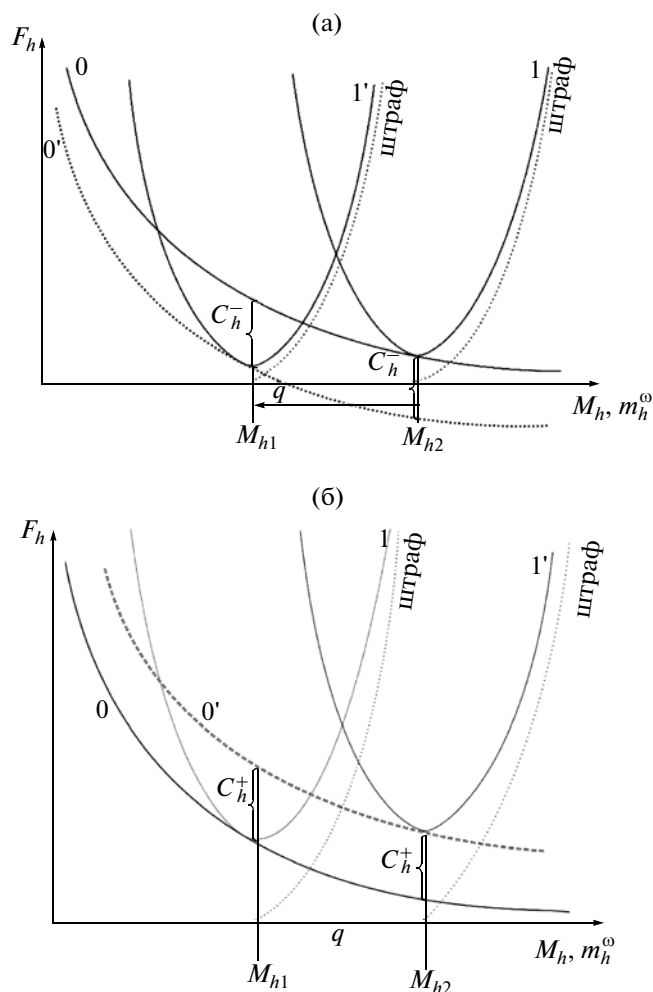


Рис. 2. Трансформация целевой функции продавца (а) и покупателя (б).

гут быть нарушены требования (4) и (5), предъявляемые к качеству водных ресурсов в водных объектах. Для того, чтобы избежать превышения массами сбрасываемых ЗВ допустимых пределов их содержания в водных объектах, необходимо ввести ограничения на объемы сбросов. Для организации такой процедуры существует управляющий орган ВХС (центр), который заинтересован в экологическом благополучии водоемов, а также в том, чтобы по возможности были удовлетворены запросы участников рынка. Его интерес выражается, в частности, в наибольших отчислениях участниками сделок в фонд, предназначенный для обеспечения эффективного функционирования ВХС

$$\phi(q) = \sum_{h \in H} [\mu_h^+ q_h^+ - \mu_h^- q_h^-], \quad (20)$$

где  $\mu_h^+$  и  $\mu_h^-$  – тарифы отчислений соответственно покупателей и продавцов,  $\mu_h^+ > 0$ ,  $\mu_h^- > 0$  (так как  $q_h^-$  –

величина отрицательная, то второе (алгебраическое) слагаемое в скобках в формуле (20) принимает положительные значения). Отчисляют и продавцы и покупатели.

Центр решает задачу  $B$  максимизации поступлений средств от совершаемых сделок, описываемых определенной (20) функцией  $\varphi(q)$ , на множестве, выделяемом требованиями, предъявляемыми к качеству водных ресурсов в водных объектах (4) и (5), ограничениями (6) и (7), налагаемыми на приращения ПДС и сбросов ЗВ, правилами преобразования приращений масс примесей в водотоках, описываемыми уравнениями (3), и уравнениями баланса приращений масс ЗВ (16) в вершинах сети  $\Gamma(J,S)$ , соответствующих створам водохозяйственной сети. В результате решения задачи  $B$  определяются величины приращений разрешений на сброс  $q$  и сбросов  $\Delta_h^0$ , формирующие новые значения ПДС  $M_h$  и новые значения сбросов  $m_h^0$ , которые назначаются пользователям водных ресурсов. В силу свойства (19) целевых функций математическое ожидание затрат на очистку стоков от ЗВ всех пользователей ВХС в результате заключенных актов купли-продажи  $F_h(M, m_h)$  меньше его исходного значения  $F_h(M^0, m_h^0)$ .

Переход от начального распределения квот  $M_h^0$  на сброс ЗВ к новым значениям  $M_h$  влечет изменение наборов величин сбросов  $m_h^0$ . Кроме того, у покупателей разрешений могут появиться части покупок  $q_h^n$ , неиспользуемые в связи с несовпадением состава их сбросов с составом сбросов продавцов, продавших им свои квоты. Появляется возможность с выгодой избавиться от излишков разрешений на сброс ЗВ, и найдутся покупатели этих излишков. В таком случае новые значения  $M_h$  и  $m_h^0$  играют роль исходного распределения разрешений и сбросов ЗВ для совершения следующего шага сделок купли-продажи квот. Подобная ситуация воспроизводится и далее, образуя итерационный процесс последовательного преобразования квот и сбросов ЗВ. На каждом шаге этого процесса значения целевых функций  $F_h(M, m_h)$ , описывающих затраты, связанные с очисткой стоков, убывают. Так как затраты не могут быть отрицательными, значения функций  $F_h(M, m_h)$  ограничены снизу. Убывающая ограниченная снизу последовательность имеет предел. По-

этому описанный итерационный процесс рыночного обмена разрешениями на сброс ЗВ сходится.

## ВЫВОДЫ

Рассмотрены особенности формирования управляемого рынка разрешений на сброс загрязняющих веществ в водоемы. Продавцы и покупатели, затраты на очистку стоков которых зависят как от технологий очистки, ориентированных на достижение ПДС, так и от режимов работы очистных сооружений, договариваются друг с другом о ценах и объемах сделок купли-продажи. Управляющий орган водохозяйственной системы обеспечивает экологическое благополучие водоемов так, чтобы по возможности были удовлетворены запросы участников рынка. В представленном подходе рынок функционирует в стохастических условиях формирования качества вод в рамках пространственно распределенной водохозяйственной системы. На рынке “ведущими” выступают предельно допустимые сбросы, играющие роль ориентиров масс примесей. Массы сбросов, при различных реализациях стохастических условий, являются “ведомыми”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вавилин В.А., Циткин М.Ю. Математическое моделирование управления качеством водной среды // Вод. ресурсы. 1977. № 5. С. 114–132.
2. ГОСТ 17.1.1.01-77. “Охрана природы. Гидросфера. Использование и охрана вод. Основные термины и определения”.
3. Глухих М.В., Желонкин С.В., Кочарян А.Г. и др. Обоснование водоохраных мероприятий в стохастических условиях с использованием математических моделей // Докл. VI Всерос. гидрологического съезда. Секция 4. М.: Росгидромет, 2006. Ч. 2. С. 221–226.
4. Данилов-Данильян В.И., Хранович И.Л. Гарантированное водопользование в рыночных условиях // Вод. ресурсы. 2009. Т. 36. С. 228–239.
5. Кречетов Л.И. Системы экономического стимулирования водоохраной деятельности предприятий. I. Платежи // Вод. ресурсы. 1991. № 4. С. 164–172.
6. Кречетов Л.И. Системы экономического стимулирования водоохраной деятельности предприятий. II. Рыночные системы // Вод. ресурсы. 1991. № 5. С. 174–184.
7. Самуэльсон П. Экономика. М.: Прогресс, 1964. 667 с.
8. Указания по методу расчета смешения и разбавления сточных вод в реках, озерах и водохранилищах. М.: ВОДГЕО, 1971. 224 с.
9. Streeter H.W., Phelps E.B. A study of the pollution and natural purification of the Ohio river // Washington: Public Health Service, 1925. V. 146. P. 1–75.