

РЫНОК ТОВАРОВ И УСЛУГ

В. А. Андреев

канд. физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник Санкт-Петербургского экономико-математического института РАН

И. Н. Боголюбов

канд. техн. наук, вед. научный сотрудник Санкт-Петербургского экономико-математического института РАН

РАЗРАБОТКА ВАРИАНТОВ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ВОДОСНАБЖЕНИЯ, ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ БОЛЬШОГО ГОРОДА ПРИ ЗАДАННЫХ ТЕМПАХ ЭКСПОРТНОГО СЕКТОРА ЭКОНОМИКИ

Введение

В предлагаемой работе сформулирована и исследована многокритериальная оптимизационная модель определения вариантов инвестиционной политики развития систем отведения и очистки сточных вод, водоснабжения, теплоснабжения и электроснабжения при заданной динамике показателей конечного спроса и темпах развития промышленных мощностей большого города. Качество состояния экономики оценивается для каждого года инвестиционного периода величиной добавленной стоимости, получаемой каждым из рассматриваемых комплексов предприятий, и суммарной добавленной стоимостью. Оптимизация осуществляется при ограничениях, задающих условия устойчивого развития экономики города. Модель позволяет получить оптимальное по Парето решение (Подинковский, Ногин, 1982). Определяемая этим решением добавленная стоимость любого из комплексов может быть им увеличена только за счет уменьшения добавленной стоимости остальных комплексов.

Предлагаемая модель является дальнейшим развитием разработанной авторами однокритериальной оптимизационной модели (Андреев, Боголюбов, 2013; Андреев, Боголюбов, Кулеш, 2013) определения состояния электроэнергетики, теплоснабжения, водоснабжения и водоотведения, обеспечивающего устойчивое развитие экономики большого города. Модель ориентирована на экономику Санкт-Петербурга.

При моделировании город рассматривается как открытая система, состоящая из природной среды, отраслевых комплексов предприятий (ОКП), производящих товары и услуги, комплекса предприятий отведения и очистки сточных вод (КООСВ), комплекса водоснабжения (КВ), теплоэнергетического комплекса (ТЭК), тепло-электроэнергетического комплекса (ТЭЭК), конечных потребителей товаров и услуг, внешних и внутренних рынков товаров и услуг. Внешние рынки предполагаются конкурентными.

Комплексы предприятий образуют внутренний и экспортный сектора экономики города. К экспортному сектору относятся предприятия, продукция которых полностью или частично реализуется на внешних рынках (Свэйлс, 2006)¹.

¹ Здесь под термином «экспорт» («импорт») понимается вывоз за пределы (ввоз из-за пределов) города.

Основу экспортного сектора Санкт-Петербурга составляют обрабатывающие предприятия, на долю которых приходится более 90% экспортируемых товаров и услуг (Санкт-Петербург в 2013 г.). К внутреннему сектору относятся КООСВ, КВ, ТЭК, ТЭЭК и другие комплексы, реализующие свою продукцию полностью на территории города.

Водоотведение и водоснабжение в Санкт-Петербурге в основном осуществляется предприятиями «Водоканала Санкт-Петербурга». Теплом и горячей водой город снабжают котельные, принадлежащие нескольким организациям, и теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), принадлежащие Невскому филиалу ГТК-1, РАО «ЕЭС России», и несколько ведомственных ТЭЦ. Кроме того, ТЭЦ снабжают город электроэнергией. Потребности города в электроэнергии частично удовлетворяются за счет внешних источников.

Предполагается, что все сточные воды сбрасываются в канализацию. КООСВ осуществляет отвод сточных вод на очистные сооружения. Концентрация загрязняющих веществ, содержащихся в поступающих на очистные сооружения сточных водах, ограничена. КООСВ может сбрасывать сточные воды в поверхностные водные объекты (ПВО). Объемы загрязняющих веществ (ЗВЩ), содержащихся в сбрасываемых в ПВО сточных водах, не должны превышать величину ассимиляционного потенциала ПВО.

В модели ТЭЭК рассматривается как система, состоящая из двух производственных комплексов, совместно использующих производственные и финансовые ресурсы. Один из комплексов (ТЭЭКт) производит тепловую энергию и горячую воду, а второй (ТЭЭКэ) генерирует электроэнергию. Таким образом, тепловую энергию производят ТЭК и ТЭЭКт, имеющие разные рынки сбыта. Предполагается, что эти комплексы реализуют тепловую энергию по одинаковым тарифам.

1. Постановка задачи и формулировка модели

Состояние рассматриваемой экономической системы определяют следующие показатели.

1. Объемы сточных вод x_1 , пропущенных через очистные сооружения города, объемы воды x_2 , поданной в водопроводные сети, объемы тепловой энергии x_3 и x_4 , произведенной котельными города и ТЭЦ соответственно, объемы электроэнергии x_5 , сгенерированной ТЭЦ, объемы продукции x_6, \dots, x_n , произведенной отраслевыми комплексами.

2. Тарифы на услуги и продукцию КООСВ, КВ, ТЭК, ТЭЭКт и ТЭЭКэ, обозначаемые через P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 соответственно, и индексы отраслевых цен P_6, \dots, P_n , где n — число рассматриваемых комплексов предприятий. В силу сделанных предположений ТЭК и ТЭЭКт реализуют тепловую энергию по одинаковым тарифам $P_3 = P_4$.

3. Объемы продукции $\tilde{x}_6, \dots, \tilde{x}_n$, реализуемой отраслевыми комплексами на внешних рынках. Для комплексов, относящихся к внутреннему сектору, объемы продукции, реализуемой на внешних рынках, равны нулю.

4. Объемы электроэнергии x^* , покупаемой ТЭЭКэ на внешних рынках.

Инвестиционная политика определяется объемами финансовых ресурсов, направленных на создание новых производственных мощностей КООСВ, КВ, ТЭК, ТЭЭКт, ТЭЭКэ, в течение каждого года рассматриваемого производственного периода.

Источниками финансовых ресурсов для инвестиций являются фонды развития, пополняемые за счет отчислений от прибыли предприятий и кредитов.

Добавленная стоимость КООСВ, КВ, ТЭК, ТЭЭКТ, ТЭЭКЭ определяется равенствами соответственно:

$$\pi_i = P_i x_i (1 - k_{nom}^{(i)}) - x_i Z_i(P_1, \dots, P_n), i \in \{1, 2, 3\}; \quad (1.1)$$

$$\pi_4 = x_4 P_3 (1 - k_{nom}^{(4)}) - x_4 Z_4(P_1, \dots, P_n); \quad (1.2)$$

$$\pi_5 = P_5 (x_5 + x^*) (1 - k_{nom}^{(5)}) - x_5 Z_5(P_1, \dots, P_n) - (x_5 + x^*) Z_5^*(P_1, \dots, P_n) - \tilde{P}_5 x^*. \quad (1.3)$$

Здесь $k_{nom}^{(i)}$ — коэффициенты потерь при реализации продукции, \tilde{P}_5 — стоимость электроэнергии на внешних рынках, $Z_i(P_1, \dots, P_n)$ — промежуточные затраты (затраты на промежуточное потребление товаров и услуг) на единицу продукции комплекса i , $Z_5^*(P_1, \dots, P_n)$ — промежуточные затраты на передачу единицы электроэнергии. Промежуточные затраты определяются равенствами:

$$Z_i(P_1, \dots, P_n) = \sum_{j=1}^n P_j R_{ji} + \sum_{j=6}^{n+m} P_j^+ \tilde{R}_{ji};$$

$$Z_5^*(P_1, \dots, P_n) = \sum_{j=1}^n P_j R_{j5}^* + \sum_{j=6}^{n+m} P_j^+ \tilde{R}_{j5}^*,$$

где $R_{ji}(\tilde{R}_{ji})$ — объем потребления продукции комплекса (отрасли) j комплексом i на внутреннем (внешнем) рынке в расчете на единицу продукции, $R_{j5}^*(\tilde{R}_{j5}^*)$ — объем потребления продукции комплекса (отрасли) j на внутреннем (внешнем) рынке для обеспечения передачи единицы объема электроэнергии потребителям.

Равенства (1.2) и (1.3) справедливы для состояний системы, удовлетворяющих следующим ограничениям:

$$\sum_{j=1}^n R_{ij} x_j \leq x_i (1 - k_{nom}^{(i)}) \leq \sum_{j=1}^n R_{ij} x_j + u_i(P_i), i \in \{2, 3, 4\}, \quad (1.4)$$

$$\sum_{j=1}^n R_{5j} x_j \leq (x_5 + x^*) (1 - k_{nom}^{(5)}) \leq \sum_{j=1}^n R_{5j} x_j + u_5(P_5); \quad (1.5)$$

$$x_1 \leq \sum_{j=1}^n R_{1j} x_j + u_1(P_1). \quad (1.6)$$

Здесь $u_i(P_i)$ — функции конечного спроса. Правые части неравенств (1.4), (1.5) означают, что КВ, ТЭК, ТЭЭКТ, ТЭЭКЭ полностью обеспечивают производственные комплексы водой, теплом и электроэнергией.

Добавленная стоимость отраслевых комплексов предприятий определяется равенством:

$$\pi_i = P_i (x_i (1 - k_{nom}^{(i)}) - \tilde{x}_i) + P_i^- \tilde{x}_i - x_i Z_i(P_1, \dots, P_n), \quad (1.7)$$

где $P_i^- \tilde{x}_i$ — доход комплекса i от продаж продукции на внешнем рынке.

Суммарная добавленная стоимость, получаемая городом за год, определяется как сумма добавленных стоимостей, получаемых рассматриваемыми комплексами предприятий:

$$\Pi = \sum_{i=1}^n \pi_i. \quad (1.8)$$

Допустимые состояния системы определяются неравенствами (1.4), (1.5), (1.6) и ограничениями:

- на тарифы:

$$P_i^- \leq P_i \leq P_i^+, \quad i \in \{1, 2, 3, 5\}, \quad (1.9)$$

где P_i^- , P_i^+ — верхние и нижние границы тарифов на услуги по отведению сточных вод, воду, тепловую энергию и электроэнергию соответственно;

- на относительные отраслевые цены:

$$P_i^- = \tilde{P}_i - \Delta\tilde{P}_i \leq P_i \leq \tilde{P}_i + \Delta\tilde{P}_i = P_i^+, \quad (1.10)$$

где $\Delta\tilde{P}_i, i \in \{6, \dots, n\}$, — приращение относительных цен, определяемое затратами на перемещение товаров между рынками, \tilde{P}_i — относительные цены на продукцию отрасли i на внешнем рынке;

- на промежуточные затраты на единицу продукции:

$$P_i(1 - k_{nom}^{(i)}) - Z_i(P_1, \dots, P_n) \geq 0, \quad i \in \{1, 2, 3, 4, 6, \dots, n\}, \quad (1.11)$$

$$P_5(1 - k_{nom}^{(5)}) - Z_5(P_1, \dots, P_n) - Z_5^*(P_1, \dots, P_n) \geq 0; \quad (1.12)$$

$$P_5(1 - k_{nom}^{(5)}) - Z_5^*(P_1, \dots, P_n) - P_5^+ \geq 0; \quad (1.13)$$

$$P_i^- - Z_i(P_1, \dots, P_n) \geq 0, \quad i \in \{6, \dots, n\}, \quad (1.14)$$

где по предположению $P_3 = P_4$;

- на концентрацию загрязняющих веществ, поступающих на очистные сооружения:

$$\sum_{i=1}^n x_i(1 - k_{nom}^{(i)})R_{i,q}(\lambda_{i,q} - \bar{\lambda}_q) + (\lambda_q^* - \bar{\lambda}_q)u_1(P_1) \leq 0, \quad q \in \{1, \dots, Q\}, \quad (1.15)$$

где $\lambda_{i,q}$ — концентрация загрязняющего вещества q в сбросах сточных вод комплексом i , λ_q^* — концентрация загрязняющего вещества q в непромышленных сбросах сточных вод, $\bar{\lambda}_q$ — максимально допустимая концентрация загрязняющего вещества q в сточных водах, поступающих на очистные сооружения, Q — количество типов загрязняющих веществ;

- на объемы сточных вод, сбрасываемых в ПВО без очистки:

$$\sum_{j=1}^n R_{j,q}x_j + u_1(P_1) - x_1 \leq \Lambda, \quad (1.16)$$

где Λ — максимально допустимые объемы сбросов сточных вод в ПВО;

- на объемы производства и экспорта продукции:

$$x_i \leq M_i, \quad \tilde{x}_i \leq x_i, \quad i \in \{1, \dots, n\}, \quad (1.17)$$

где M_i — производственные мощности рассматриваемых производственных комплексов;

- на трудовые ресурсы:

$$\sum_{i=1}^J s_{ij} x_i / k_{pw}^{(i)} \leq S_j W, \quad j \in \{1, \dots, J\}, \quad (1.18)$$

где $\sum_{j=1}^J s_{ij} = 1$, $\sum_{i=1}^J S_i = 1$, $(s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{iJ})$ — вектор, определяющий профессиональную структуру трудовых ресурсов комплекса i , $(s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{iJ})$ — вектор, определяющий профессиональную структуру рынка трудовых ресурсов города, J — число профессиональных групп, $k_{pw}^{(i)}$ — коэффициент, определяющий соотношение между производственными мощностями и объемами трудовых ресурсов, необходимых для их использования.

В случае отсутствия ограничений на инвестиционные ресурсы задача определения оптимальной инвестиционной политики сводится к решению (для каждого года рассматриваемого производственного периода) задачи определения оптимального по Парето состояния системы без ограничений на мощности КООСВ, КВ, ТЭК, ТЭЭКт и ТЭЭКэ. Объемы приращения производственных мощностей и соответствующие объемы инвестиций определяются через определяемые оптимальным состоянием объемы производства товаров (услуг), коэффициенты потерь при реализации товаров (услуг), коэффициенты использования производственных мощностей и относительные цены на продукцию фондообразующих отраслей.

При наличии ограничений на финансовые ресурсы, которые могут быть направлены на увеличение производственных мощностей КООСВ, КВ, ТЭК, ТЭЭКт, ТЭЭКэ, объемы инвестиций на их развитие определяются для каждого года t в два этапа.

На первом этапе определяется оптимальное по Парето состояние системы при максимальных производственных мощностях $M_i, i \in \{1, \dots, 5\}$, которые могут быть созданы за счет финансовых ресурсов, накопленных в фондах развития. Объемы этих мощностей определяются равенствами:

$$M_i = \tilde{M}_i^{(t)} = M_i^{(t)} + (\Phi_i^{(t)} / p_r^{(t)}) / k_i, \quad (1.19)$$

где $\Phi_i^{(t)}$ — величина фонда развития на начало года t , $M_i^{(t)}$ — производственные мощности на начало года t , $p_r^{(t)}$ — индекс цен на продукцию фондообразующих отраслей, k_i — коэффициент, определяющий соотношение между объемами основных фондов и производственными мощностями комплекса i . Затем вычисляются производственные мощности, которые должны быть созданы в течение года t , и соответствующие объемы инвестиций. Если имеющиеся производственные мощности с учетом износа не меньше объема производства, определяемого полученным решением, инвестиции не требуются. В общем случае производственные мощности и соответствующие объемы инвестиций определяются равенствами:

$$M_i^{(t+1)} = \bar{M}_i = \begin{cases} M_i^{(t)}(1 - q_i), & x_i^{(t)} \leq M_i^{(t)}(1 - q_i), \\ x_i^{(t)}, & x_i^{(t)} > M_i^{(t)}(1 - q_i), \end{cases} \quad (1.20)$$

$$I_i^{(t)} = (\bar{M}_i - M_i^{(t)}(1 - q_i)) k_i p_r^{(t)}, \quad (1.21)$$

где $x_i^{(t)} \leq \tilde{M}_i^{(t)}$ — объемы производства, определяемые полученным решением, q_i — коэффициенты амортизации. Предполагается, что инвестиции $I_i^{(t)}$ осваиваются в начале периода t и соответствующие мощности используются в течение всего периода.

На втором этапе решается оптимизационная задача с $M_i = \bar{M}_i, i \in \{1, \dots, 5\}$. Полученное решение определяет состояние системы на начало года $t + 1$. Фонд развития на начало года $t + 1$ определяется равенством:

$$\Phi_i^{(t+1)} = \Phi_i^{(t)} + \tilde{\Pi}_i^{(t)} \delta_i - I_i^{(t)}, \quad (1.22)$$

где $\tilde{\Pi}_i^{(t)}$ — прибыль за год t , определяемая на основе полученного решения (Андреев, Боголюбов, 2013), δ_i — доля прибыли, направляемая на развитие, $I_i^{(t)}$ — инвестиции.

Инвестиции и кредиты для ОКП при заданной динамике производственных мощностей ОКП определяются равенствами:

$$I_i^{(t)} = (M_i^{(t+1)} - M_i^{(t)}(1-q))k_i p_r^{(t)} \quad (1.23)$$

$$C_i^{(t)} = \begin{cases} 0, & \Phi_i^{(t)} \geq I_i^{(t)}, \\ I_i^{(t)} - \Phi_i^{(t)}, & 0 \leq \Phi_i^{(t)} \leq I_i^{(t)}, \\ I_i^{(t)}, & \Phi_i^{(t)} \leq 0, \end{cases} \quad (1.24)$$

где $i \in \{6, \dots, n\}$. Объемы фондов развития $\Phi_i^{(t+1)}, i \in \{6, \dots, n\}$, > ОКП определяются равенством (1.22).

2. Методы и алгоритмы решения сформулированных оптимизационных задач

Глобальное решение задачи максимизации суммарной добавленной стоимости рассматриваемых производственных комплексов одновременно является оптимальным по Парето решением сформулированной многокритериальной задачи. Максимизация суммарной добавленной стоимости, определяемой равенством (1.8), на множестве допустимых состояний системы, определяемом неравенствами (1.4), (1.5), (1.6) и неравенствами с (1.9) по (1.18), в общем случае сводится к задаче максимизации билинейной квадратичной формы:

$$\Pi(y) = \Pi(p, x) = p^T Fx \rightarrow \max \quad (2.1)$$

на множестве:

$$Y = \{y | y^T G \leq B, y^T = (p^T, x^T)\}. \quad (2.2)$$

В (2.1) и (2.2) $p^T = (P_1, \dots, P_n)$, $x^T = (x_1, x_2, \dots, x_n, \tilde{x}_6, \dots, \tilde{x}_n, x^*)$, $y^T = (p^T, x^T)$ — вектор, определяющий состояние рассматриваемой экономической системы, F — матрица размерности $n \times (3n - 4)$, G — матрица размерности $g \times (3n - 4)$, g — число неравенств, определяющих допустимые состояния рассматриваемой системы.

Определение оптимального по Парето решения многокритериальной задачи начинается с нахождения приближенного решения задачи (2.1) и (2.2).

Решение этой задачи начинается с нахождения допустимой точки y_0 , принадлежащей множеству Y . Для повышения эффективности предлагаемых вычислительных алгоритмов находится точка y_0 , являющаяся внутренней точкой множества Y . Точка y_0 находится с помощью процедуры, которая сводится к решению нескольких задач линейного программирования на множестве допустимых точек Y .

Для нахождения приближенного решения задачи (2.1) и (2.2) в модели используется последовательно несколько методов. Сначала находится приближенное решение задачи методом частичной линеаризации и максимизации на отрезках. Суть метода заключается в следующем. Используя найденную внутреннюю

точку $y_0^T = (p_0^T, x_0^T)$ множества Y , строятся и решаются две задачи линейного программирования:

задача 1: $p_0^T Fx \rightarrow \max, x \in \{x | (p_0^T, x^T)G \leq B\}$;

задача 2: $p^T Fx_0 \rightarrow \max, p \in \{p | (p^T, x_0^T)G \leq B\}$.

Пусть x_1 и p_1 — решения задач 1 и 2. Тогда $(p_0, x_1) \in Y, p_0^T Fx_1 \geq p_0^T Fx_0$, $(p_1, x_0) \in Y, p_1^T Fx_0 \geq p_0^T Fx_0$. В силу выпуклости множества Y имеем:

$$y(\lambda)^T = \lambda(p_0^T, x_1^T) + (1-\lambda)(p_1^T, x_0^T) = (p(\lambda), x(\lambda)) \in Y \text{ для } \forall \lambda \in [0,1].$$

Пусть $y_1 = y(\lambda_1)^T = (p(\lambda_1)^T, x(\lambda_1)^T)$ — решение задачи $p(\lambda)^T Fx(\lambda) \rightarrow \max, \lambda \in [0,1]$.

Тогда:

$$\Pi(y_1) = p(\lambda_1)^T Fx(\lambda_1) \geq \max\{p_0^T Fx_1, p_1^T Fx_0\} \geq p_0^T Fx_0 = \Pi(y_0). \quad (2.3)$$

Последовательно применяя описанную процедуру к полученным в результате ее реализации точкам, получаем последовательность точек y_0, y_1, \dots и монотонно возрастающую последовательность соответствующих значений добавленной стоимости $\Pi(y_0), \Pi(y_1)$. Так как $\Pi(y)$ — непрерывная функция и множество Y ограничено и замкнуто, то $\Pi(y_i) \xrightarrow{i \rightarrow \infty} \Pi_0 < \infty$. В качестве приближенного решения задачи максимизации суммарной добавленной стоимости берется точка \tilde{y}_0 , удовлетворяющая неравенству $\Pi_0 - F(\tilde{y}_0) \leq \varepsilon$, где ε — заданная точность.

Полученное с помощью процедуры частичной линеаризации приближенное решение уточняется с помощью градиентных методов. В модели использованы методы Зойтендейка и Розена (Базара, Шетти, 1982).

Улучшенное с помощью градиентных методов приближенное решение задачи максимизации суммарной добавленной стоимости \tilde{y}_0 используется в качестве исходной точки для определения оптимального по Парето состояния системы.

Предлагаемая процедура предполагает последовательное решение частных задач максимизации суммарной добавленной стоимости для КООСВ, КВ, ТЭЭКэ, каждого из отраслевых комплексов предприятий и пары комплексов ТЭК и ТЭЭКт, производящих тепловую энергию. Каждая из последующих задач использует в качестве исходной точки решение предыдущей. Максимизация осуществляется по переменным, которые могут варьировать соответствующий комплекс или пара комплексов ТЭК и ТЭЭКт.

Предполагается, что КООСВ может варьировать тариф P_1 и объем очистки сточных вод x_1 , КВ — тариф P_2 и объем подачи воды в водопроводные сети города x_2 . Каждый из отраслевых комплексов $i \in \{6, \dots, n\}$ может варьировать индекс цен P_i , объем производства x_i и объем экспорта \tilde{x}_i , ТЭЭКэ может варьировать тариф P_i , объем генерации электроэнергии x_5 и объем электроэнергии, покупаемой на внешних рынках x^* , ТЭК и ТЭЭКт вместе могут варьировать тариф P_3 и объемы производства x_3, x_4 .

В общем случае частные задачи максимизации для КООСВ, КВ, ТЭЭКэ, отраслевых комплексов и пары ТЭК и ТЭЭКт сводятся к задаче вида:

$$az_1z_2 + bz_1z_3 + cz_1 + dz_2 + ez_3 \rightarrow \max \quad (2.4)$$

на множестве:

$$\{z | \bar{z} \leq z \leq \bar{\bar{z}}, Hz \leq h\} \quad (2.5),$$

где a, b, c, d, e — коэффициенты функции качества, $z^T = (z_1, z_2, z_3)$, $\bar{z}^T = (\bar{z}_1, \bar{z}_2, \bar{z}_3)$, $\bar{\bar{z}}^T = (\bar{\bar{z}}_1, \bar{\bar{z}}_2, \bar{\bar{z}}_3)$, H — матрица размерности $g \times 3$, $h^T = (h_1, h_2, h_3)$.

Для каждой из частных задач определяется точка глобального максимума и соответствующая ей точка из множества Y . В результате решения частных задач получаем точку \tilde{y}_1 , удовлетворяющую неравенству $\Pi(\tilde{y}_1) \geq \Pi(\tilde{y}_0)$.

Процесс решения частных задач повторяется с исходной точки, найденной на предыдущем шаге и т. д. В результате получаем последовательность точек $\tilde{y}_0, \tilde{y}_1, \dots$ и монотонно возрастающую последовательность $\Pi(\tilde{y}_0), \Pi(\tilde{y}_1), \dots$. Функция $\Pi(y)$ непрерывная, множество допустимых состояний ограничено и замкнуто. Следовательно, $\Pi(\tilde{y}_i) \xrightarrow{i \rightarrow \infty} \Pi_{\max} < \infty$. В качестве приближенного оптимального по Парето решения берется точка y_{Π} , удовлетворяющая неравенству $\Pi_{\max} - \Pi(y_{\Pi}) \leq \varepsilon$, где ε — заданная точность.

3. Информационное и программное обеспечение модели

Для использования модели в практических расчетах разработана ее компьютерная реализация, предусматривающая:

- загрузку типовых вариантов описания экономики города из собственной информационной базы и возможность пополнения информационной базы;
- возможность оперативного изменения вариантов исходных данных, осуществляемого пользователем в интерактивном режиме;
- возможность многовариантных расчетов для различных описаний экономики города в рамках одного сеанса;
- табличную выдачу результатов расчета текущего варианта в различных разрезах;
- возможность сохранения полученных результатов в информационной базе с целью последующей их загрузки для сопоставительного анализа.

Исходные для расчетов данные представлены в форме текстовых файлов специальной структуры. Различаются файлы двух типов: файл описания конкретного комплекса и файл описания экономических характеристик города в целом. Стандартный состав данных этих файлов вытекает из описания модели, представленного выше.

Интерфейс системы обеспечивает визуализацию основных исходных данных текущего варианта расчета, их оперативную корректировку по желанию пользователя, а при необходимости неоднократного использования модифицированного варианта в дальнейшем — сохранение его в информационной базе.

Разработанная система позволяет пользователю, специалисту в области региональной экономики, без специальной компьютерной подготовки осуществлять анализ различных вариантов развития экономики города.

4. Экспериментальная проверка модели

Рассматривается сформулированная в предыдущем разделе модель для случая, когда экспортный сектор экономики города состоит из комплекса обрабатывающих

предприятий (КОП). Относительно остальных отраслевых комплексов предполагается, что они образуют внутренний сектор экономики, их промежуточное потребление рассматривается как конечное.

В экспериментальных расчетах использовались статистические данные экономики Санкт-Петербурга за 2009–2011 гг., опубликованные Территориальным органом Федеральной службы государственной статистики по Санкт-Петербургу и Ленинградской области, Администрацией Санкт-Петербурга и соответствующими организациями, занимающимися регулируемым видами деятельности в области водоснабжения, теплоснабжения, электроснабжения.

Суммарная тепловая мощность расположенных на территории города ТЭЦ и котельных в рассматриваемом периоде составляла 24 428 Гкал в сутки, а суммарная электроэнергетическая мощность ТЭЦ — 3834 МВт. Примерно 30% потребляемой электроэнергии поступало из-за пределов города (Генеральная схема теплоснабжения Санкт-Петербурга на период до 2015 г.; Региональная программа Санкт-Петербурга в области энергоснабжения, 2011).

Среднесуточная подача питьевой воды в водопроводную сеть Санкт-Петербурга составляет около 2,5 млн куб. м. Через очистные сооружения пропускается около 2,4 млн куб. м сточных вод при 3 млн куб. м, образующихся в городе за сутки (Генеральные схемы водоснабжения и водоотведения Санкт-Петербурга на период до 2015 г.).

Решается задача обеспечения города водными ресурсами, услугами по отведению сточных вод, тепловой энергией и электроэнергией на трехлетнем производственном периоде при заданной динамике производственных мощностей КОП, определяемой значениями 994 090, 1 422 391, 2 127 154 млн руб./год, и заданной динамике показателей конечного спроса (см. табл. 1 и 2).

Таблица 1

Показатели конечного спроса¹

Год	Водоотведение КООСВ			Водоснабжение КВ			Тепловая энергия ТЭК		
	Тариф, руб./м ³	Спрос, м ³	Коэфф. эластичн.	Тариф, руб./м ³	Спрос, м ³	Коэфф. эластичн.	Тариф, руб./Гкал	Спрос, Гкал	Коэфф. эластичн.
1	17,11	720	0	14,77	305	12,5	600	17,73	2,8
2	17,11	750	0	14,77	728	12,5	600	17,73	2,8
3	17,11	760	0	14,77	728	12,5	600	17,73	2,8

Таблица 2

Показатели конечного спроса (продолжение)

Год	Тепловая энергия ТЭЭКт			Электроэнергия ТЭЭКэ			Продукция обрабатывающих предприятий КОП		
	Тариф, руб./Гкал	Спрос, Гкал	Коэфф. эластичн.	Тариф, руб./кВтч	Спрос, кВтч	Коэфф. эластичн.	Индекс цен	Спрос, руб.	Коэфф. эластичн.

¹ При расчете коэффициентов эластичности использована формула центральной точки.

1	600	20,3	2,68	1,77	15 405	2,73	0,8	460 364	0,75
2	600	20,3	2,68	1,77	15 405	2,73	0,8	460 364	0,75
3	600	20,3	2,68	1,77	15 405	2,73	0,8	460 364	0,75

Значения основных показателей начального состояния рассматриваемой экономической системы приведены в табл. 3 (Санкт-Петербург в 2013 г.). Структура рынка труда определяется двумя профессиональными группами. Объем рынка труда в модели принят равным 2606 тыс. человек. Численность первой профессиональной группы — 1048 тыс. человек, второй — 1559 тыс. человек. Средняя величина заработной платы для первой группы составляет 25 тыс. руб., для второй — 20 тыс. руб.

Таблица 3

Начальное состояние системы

Показатели		КООСВ	КВ	ТЭК	ТЭЭКт	ТЭЭКэ	КОП
Производственные мощности		839 млн м ³ / год	884 млн м ³ / год	104,8 млн Гкал/ год	107,1 млн Гкал/ год	6611 млн кВтч/ год	994 090 млн руб./ год
Процент использования		100	100	19,5	19	45	100
ОФ, млн руб.	активные	2206	1744	3286	2206	2528	81 577
	пассивные	38 721	44 095	3560	2390	2068	127 591
Основной производственный персонал, чел.		3430	3906	6664	3035	1647	349 800
Коэффициент потерь при реализации		0	0,233	0,106	0,034	0,124	0
Фонд развития, млн руб.		30	604	661	557	226	49 842

Расчеты проведены для варианта 1, когда цена на газ равна 1,5 руб./м³ на всем производственном промежутке, и варианта 2, когда для первого года цена равна 2,5 руб./м³, а для каждого последующего года увеличивается на 0,5 руб./м³.

Анализ результатов экспериментальных расчетов по варианту 1 показывает, что КООСВ, КВ, ТЭК, ТЭЭКт, ТЭЭКэ могут за счет собственных финансовых ресурсов наращивать свои производственные мощности до оптимальных объемов, необходимых для обеспечения водой, теплом и электроэнергией заданной динамики развития КОП на всем трехлетнем периоде (см. колонки 3, 4, 5, 6 в табл. 4). При увеличении цен на газ от 2,5 до 3 руб./м³ заданная динамика производственных мощностей КОП может быть обеспечена теплом, электроэнергией и водой только за счет увеличения стоимости тепловой энергии до 908,72 руб./Гкал, что приведет к уменьшению конечного спроса на тепловую энергию до 16 млн Гкал/год

(8 млн Гкал тепловой энергии, производимой ТЭК, и 8 млн Гкал — производимой ТЭЭКт). Данные по конечному спросу и тарифам приведены в колонках 8 табл. 4, 6 и колонках 13 табл. 5, 7. Кроме того, при цене на газ 2,5 руб./м³ комплекс ТЭК становится убыточным (см. колонку 14 в табл. 7), производственные мощности ТЭК и ТЭЭКт уменьшаются на всем рассматриваемом производственном периоде за счет износа основных фондов (см. колонку 6 в табл. 6).

Таблица 4

Результаты экспериментальных расчетов по варианту 1

Комплекс	Год	Кредит, млн руб.	Фонд развития, млн руб.	Инвестиции, млн руб.	Мощность	Объем пр-ва	Конечный спрос
КООСВ	1	0,00	30	0,00	839,00 млн м ³ /год	798 млн м ³ / год	720 млн м ³
	2	0,00	40	510,29	882,83	883	750
	3	0,00	22	568,08	968,52	969	760
КВ	1	0,00	604	0,00	884,03 млн м ³ /год	865 млн м ³ / год	305 млн м ³
	2	0,00	0	1167,70	1418,00	1418	646
	3	0,00	15	733,50	1697,01	1697	728
ТЭК	1	0,00	0	661,00	125,88 млн Гкал/год	25 млн Гкал/ год	10 млн Гкал
	2	0,00	0	172,18	126,71	25	10
	3	0,00	0	198,86	128,37	25	9
ТЭЭКэ	1	0,00	0	226,00	7201,93 млн кВтч/год	3241 млн кВтч/год	4377 млн кВтч
	2	0,00	0	1304,16	10 345,51	4655	4318
	3	0,00	0	1433,19	13 710,15	6170	3801
КОП	1	0,00	49 842	47 070,20	994 090 млн руб./год	994 090 млн руб./год	340 364 млн руб.
	2	27731,24	48 672	76 402,78	1 422 391	1 422 391	340 364
	3	0,00	31 094	0,00	2 127 154	2 127 154	340 364
ТЭЭКт	1	0,00	557	0,00	107,13 млн Гкал/год	13 млн Гкал/год	12 млн Гкал
	2	0,00	575	0,00	103,17	13	11
	3	0,00	611	0,00	99,35	13	11

Таблица 5

Результаты экспериментальных расчетов по варианту 1 (продолжение)

Комплекс	Год	Спрос	Потери	Импорт ТЭЭКэ / экспорт КОП	Сброс в ПВО, млн м ³	Тариф / индекс цен	Прибыль, млн руб.
КООСВ	1	847,53 млн м ³	0,00	0,00	50	18,11 руб./м ³	5206,35
	2	932,82	0,00	0,00	50	18,11	5493,82
	3	1018,51	0,00	0,00	50	18,11	7360,64
КВ	1	663,25 млн м ³	201,48 млн м ³	0,00	0,00	14,77 руб./м ³	5637,04
	2	1087,60	330,39	0,00	0,00	14,99	7486,77
	3	1301,59	395,40	0,00	0,00	14,77	6956,94
ТЭК	1	11,06 млн Гкал	2,60 млн Гкал	0,00	0,00	814,85 руб./Гкал	1721,82
	2	11,05	2,62	0,00	0,00	826,38	1988,58
	3	11,34	2,65	0,00	0,00	837,08	2283,59
ТЭЭКэ	1	8318,38 млн кВтч	1177,49 млн кВтч	6255 млн кВтч	0,00	2,84 руб./кВтч	13 041,61
	2	9557,58	1352,901	6255	0,00	2,84	14 331,87
	3	10 883,92	1540,65	6255	0,00	2,89	16 274,14
КОП	1	415 291,31 млн руб.	0,00	578 798,7 млн руб.	0,00	1,20	458 997,47
	2	447 567,88	0,00	974 823,1	0,00	1,20	588 257,31
	3	500 566,06	0,00	1 626 588	0,00	1,20	797 461,06
ТЭЭКт	1	12,52 млн Гкал	0,44 млн Гкал	0,00	0,00	814,85 руб./Гкал	3349,25
	2	12,46	0,44	0,00	0,00	826,38	3560,91
	3	12,70	0,45	0,00	0,00	837,08	3917,47

Таблица 6

Результаты экспериментальных расчетов по варианту 2

Комплекс	Год	Кредит, млн руб.	Фонд развития, млн руб.	Инвестиции, млн руб.	Мощность	Объем пр-ва	Конечный спрос
КООСВ	1	0,00	30	0,00	839,00 млн м ³ /год	798 млн м ³ /год	720 млн м ³
	2	0,00	48	501,98	878,28	878	750
	3	0,00	46	548,26	954,28	954	760
КВ	1	0,00	604	0,00	884,03 млн м ³ /год	878 млн м ³ /год	305 млн м ³
	2	0,00	0	1185,02	1426,78	1427	674
	3	0,00	128	614,13	1644,72	1645	726
ТЭК	1	0,00	0	661,00	125,88 млн Гкал/год	25 млн Гкал/год	12 млн Гкал
	2	0,00	0	0,00	121,22	22	8
	3	0,00	0	0,00	116,74	20	7
ТЭЭКэ	1	0,00	0	226,00	7 201,93 млн кВтч/год	3241 млн кВтч/год	4296 млн кВтч
	2	0,00	0	1 098,50	9 807,77	4 413	4 214
	3	0,00	0	987,49	12 026,93	5 412	3 364
КОП	1	0,00	49 842	47 070,20	994 090 млн руб./год	994 090 млн руб./год	340 364 млн руб.
	2	27 721	48 681	76 402,78	1 422 391	1 422 391	340 364
	3	0,00	31 092	0,00	2 127 154	2 127 154	340 364
ТЭЭКт	1	0,00	557	0,00	107,13 млн Гкал/год	16 млн Гкал/год	14 млн Гкал
	2	0,00	381	0,00	103,17	11	10
	3	0,00	203	0,00	99,35	10	8

Таблица 7

Результаты экспериментальных расчетов по варианту 2 (продолжение)

Комплекс	Год	Спрос	Потери	Импорт ТЭЭКэ / экспорт КОП	Сброс в ПВО	Тариф	Прибыль, млн руб.
КООСВ	1	847,53 млн м ³	0,00	0,00	50 млн м ³	18,11 руб./м ³	5203,88
	2	928,27	0,00	0,00	50	18,11	5462,01
	3	1004,27	0,00	0,00	50	18,11	7236,45
КВ	1	673,79 млн м ³	204,69 млн м ³	0,00	0,00	14,77	5810,23
	2	1094,43	332,44	0,00	0,00	14,92	7418,84
	3	1261,50	383,22	0,00	0,00	14,77	6719,01
ТЭК	1	13,24 млн Гкал	2,60 млн Гкал	0,00	0,00	753,27 руб./Гкал	-3205,75
	2	9,68	2,30	0,00	0,00	865,01	-2296,00
	3	8,80	2,09	0,00	0,00	908,72	-2849,14
ТЭЭКэ	1	8318,38 млн кВтч	1177,49 млн кВтч	6255 млн кВтч	0,00	2,84 руб./кВтч	10 985,04
	2	9346,00	1322,89	6255	0,00	2,85	9874,91
	3	10 220,40	1446,72	6255	0,00	2, 93	8950,75
КОП	1	415 292,53 млн руб.	0,00	578 797,5 млн руб.	0,00	1,20	459 095,84
	2	447 549,69	0,00	974 841,3	0,00	1,20	588 131,38
	3	500 503,62	0,00	1 626 650,4	0,00	1,20	796 931,81
ТЭЭКт	1	15,02 млн Гкал	0,53 млн Гкал	0,00	0,00	753,27 руб./Гкал	1753,88
	2	10,89	0,38	0,00	0,00	865,01	1150,76
	3	9,79	0,34	0,00	0,00	908,72	665,76

Для каждого года производственного периода в точках, определяющих оптимальные состояния экономики города, объемы предложения товаров и услуг КООСВ КВ, ТЭЭКэ с учетом потерь, сбросов в ПВО, экспорта и импорта совпадают со спросом:

- КООСВ см. колонки 7, 10, 12, 9 из табл. 4–7;
- КВ см. колонки 7, 10, 9 из табл. 4–7;
- ТЭЭКэ см. колонки 7, 10, 11, 9 из табл. 4–7.

Объемы продукции КОП, реализуемой на внутреннем рынке, совпадают с внутренним спросом (см. колонки 7, 10, 11, 9. в табл. 4–7).

Дисбаланс спроса и предложения наблюдается для тепловой энергии, производимой ТЭК и ТЭЭКт. Это объясняется тем, что по условиям модели ТЭК и ТЭЭКт реализуют свою продукцию на разных рынках по одинаковой цене.

Таким образом, полученные оптимальные состояния системы являются частично устойчивыми.

Анализ данных колонки 3 в табл. 4 и 6 показывает, что КОП не может поддерживать заданные темпы развития производственных мощностей на всем производственном периоде только за счет собственных ресурсов. В середине рассматриваемого производственного периода КОП потребуются кредиты в размере 27 731,24 млн руб. и 27 721 млн руб. соответственно.

Объемы инвестиций для каждого года рассматриваемого периода определяются с помощью предлагаемой модели так, как это показано в разд. 2. Для варианта 1 объемы инвестиций в развитие рассматриваемых комплексов приведены в табл. 4, для варианта 2 — в табл. 6 (см. колонку 5).

Анализ результатов экспериментальных расчетов показал, что предлагаемая модель после соответствующей информационной доработки может быть использована для решения задач развития систем водоснабжения, теплоснабжения и электроснабжения большого города.

Источники

Андреев В. А., Боголюбов И. Н. Моделирование вариантов устойчивого функционирования и развития энергетики и водоснабжения большого города (на примере Санкт-Петербурга) // *Финансы и бизнес.* 2013. № 2. С. 119–126.

Андреев В. А., Боголюбов И. Н., Кулеш В. П. Формирование тарифной политики и определение вариантов распределения квот на воду и энергетические ресурсы, обеспечивающих устойчивое развитие промышленности большого города // *Вестник Санкт-Петербургского государственного университета.* Сер. 7. 2013. Вып. 1.

Базара М., Шетти К. Нелинейное программирование. Теория и алгоритмы. М., 1982.

Генеральная схема теплоснабжения Санкт-Петербурга на период до 2015 года с перспективой до 2025 года // *Официальный сайт Администрации Санкт-Петербурга.* [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://gov.spb.ru/gov/admin/otrasl/ingen/strateg/teplosnab>.

Генеральные схемы водоснабжения и водоотведения Санкт-Петербурга на период до 2015 года с учетом перспективы до 2025 года. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://gov.spb.ru/gov/admin/otrasl/ingen/strateg/vodosnab>.

Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето оптимальные решения многокритериальных задач. М., 1982.

Региональная программа Санкт-Петербурга в области энергоснабжения и повышения энергетической эффективности (в ред. постановления Правительства Санкт-Петербурга от 24 февраля 2011 г. № 232). [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=SPB;n=108617;fld=134;dst=4294967295;from=101263-3>.

Санкт-Петербург в 2013 году. Официальное издание. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://petrostat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/petrostat/resources/b35f3d00466a2f3c8317ef843e8e3539/GOR.pdf.

Свэйлс Д. К. Определение мультипликаторов экспортной базы региона в присутствии ресурсных ограничений: подход Норта // *Пространственная экономика.* 2006. № 1. С. 109–137.