

УДК 504.75

DOI: 10.17277/voprosy.2023.04.pp.085-096

### К ВОПРОСУ О ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПРИРОДО-ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ

А. А. Баламутова, Н. С. Попов, А. И. Анохин, Л. Н. Чуксина

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Тамбов, Россия; ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия; ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** очистные сооружения; предельные состояния; природо-промышленные системы; пропускная способность; региональная экономика; системный подход; устойчивое развитие.

**Аннотация:** Концепция пропускной способности природо-промышленных систем – надежный способ понимания причин неустойчивого поведения объектов региональной экономики. Устранению диспропорции между реальными возможностями ресурсной базы региона, его хозяйственной активностью и качеством окружающей среды в проблеме устойчивого развития способствуют методы поиска компромиссных решений. Предложен научный подход к согласованию нагрузки на очистные сооружения с их предельной пропускной способностью.

#### Введение

Понятие предельных возможностей, а точнее предельных состояний (ПС) работоспособности производственных систем, давно используется в различных сферах инженерной деятельности. Оно ассоциируется с наличием внешних или внутренних воздействий такого типа, при которых системы перестают удовлетворять заданным требованиям, теряют свою устой-

---

Баламутова Анна Андреевна – аспирант кафедры «Природопользование и защита окружающей среды»; Попов Николай Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», ТамбГТУ, Тамбов, Россия; Анохин Артем Игоревич – аспирант кафедры экономики и управления организациями, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия; Чуксина Людмила Николаевна – кандидат педагогических наук, доцент кафедры зарубежной филологии и прикладной лингвистики, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет имени Г. Р. Державина», Тамбов, Россия.

чивость и живучесть (для экосистем – упругую устойчивость [1]) и не пригодны к дальнейшей нормальной эксплуатации.

В строительной механике ПС рассматриваются применительно к прочности зданий и сооружений и различаются по характеру возможных последствий. Для оценки их несущей способности используют экспериментальные и расчетные методы, в основу которых положены коэффициенты запаса прочности конструкций, учитывающие целый ряд важнейших факторов, включая «статистическую изменчивость свойств материалов (грунтов)» [2].

В практике применения методов теории надежности для широкого класса производственных систем понятие «предельное состояние» характеризует такие условия, при которых дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно [3]. Критерий ПС – признак или совокупность признаков, установленных в документации, появление которых свидетельствует о возникновении ПС объекта (системы) [3, 4].

Иная трактовка предельного состояния необходима в случаях отступления от «надежных» характеристик производственных систем и переключения внимания на их функциональные возможности. Классическим примером этому является передача информации по каналам связи. В информационных системах понятие ПС связано с установлением предела их *пропускной способности*, поскольку наличие помех в каналах связи приводит к ограничению и потере информации в сообщении. Оценивая такую потерю, можно рассчитать пропускную способность канала, понимая под этим максимально возможное количество информации, передаваемое по каналу в единицу времени [5]. Для этого необходимо знать априорную (на выходе передатчика) и апостериорную (на входе приемника) энтропию сообщения. Под словом «канал» здесь понимается среда, используемая для передачи сигнала от передающего устройства к получателю, представляющая собой витую пару, кабель, полосу радиочастот и т.п. [5].

Энтропийный подход может быть полезен, в частности, для оценки пропускной способности дискретных производственных систем, если известны вероятности технологических операций (состояний) до и после их реализации в соответствии с регламентом.

Согласно С. И. Ожегову [6] пропускная способность означает «возможность в определенный срок принять, обслужить, перевезти кого-либо или что-нибудь в максимальном количестве». Для экосистем это понятие отождествляется с емкостью среды обитания биологических видов. Оно трактуется как максимальный размер популяции, который среда может стабильно поддерживать, обеспечивать пищей, укрытием, водой и другими необходимыми благами. В этих разных определениях присутствует одна общая особенность, а именно – отражение в понятии «пропускная способность» предельной (для сложившегося спектра обстоятельств) скорости протекания процессов в промышленных и экологических системах.

В физико-химических и биологических процессах оценка пропускной способности не столь однозначна как, например, для информационных систем, по причине того, что в них среда «передачи сигналов» представляет собой «многокомпонентную и многофазную сплошную среду, распределенную в пространстве (в пределах емкости аппарата или биотопа эко-

системы), и переменную во времени, в каждой точке гомогенности которой и на границе раздела ее фаз происходит перенос массы, энергии, импульса, момента импульса, заряда (электрического, магнитного), при наличии их источников и стоков» [6].

Из такого описания среды очевидно, что носителями физико-химической и биологической информации в производственных системах оказываются разнообразные по сути и различные по скорости передачи агенты, для каждого из которых существует своя пропускная способность в кинетической, диффузионной или пограничной областях протекания процессов. Необходимо учесть и тот факт, что производственные и экологические системы обладают сложными структурами, пропускная способность которых, как правило, ограничивается неким «лимитирующим звеном» или «узким местом», не всегда известным заранее.

Принимая во внимание данные обстоятельства, можно констатировать, что оценка пропускной способности природо-промышленных систем (ППС) является сложной задачей, решение которой предполагает исследование качества интересующих процессов на моделях, выявление лимитирующих звеньев и определение особых условий, для которых важно знать предельную пропускную способность.

*Цель работы* – разработка научного подхода к решению названных задач.

### **Необходимость оценки пропускной способности ППС в проблеме устойчивого развития**

В Концепции перехода РФ к устойчивому развитию заявлено, что устойчивое развитие России возможно в условиях обеспечения устойчивого развития ее регионов. Такое решение оправдано по ряду причин, одна из которых заключается в том, что региональные экономики демонстрируют практически весь спектр процессов, происходящих в отношениях природы и общества, высвечивая при этом и обстоятельства их неустойчивого поведения. Глубокое понимание механизмов формирования таких отношений является ключевым фактором успешного решения региональных задач устойчивого развития. Особое место в рассматриваемых отношениях отводится динамическому взаимодействию хозяйственной деятельности социума с экосистемами, входящими в городские агломерации.

Многие исследователи сходятся во мнении, что рост доходов населения приводит к увеличению экологической деградации только до определенного момента, после достижения которого качество среды обитания начинает улучшаться, то есть с повышением уровня жизни населения происходит и улучшение его экологического благополучия. И на это есть много известных примеров. Вместе с тем приходится сознавать, что ресурсы регионов, как и всей планеты в целом, ограничены. Их нерациональное использование в настоящем отрицает прогресс в развитии будущих поколений граждан. Отсюда следует вывод о необходимости учета пропускной способности регионов в проектах долгосрочного планирования, осознавая при этом, что пропускная способность природных систем, так же как и техногенных, не является жестко фиксированной, поскольку зависит от уровня развития технологий, предпочтений, структуры общественного производства и потребления, ценовой политики и характера от-

ношений общества с природой. Ориентированная в основном на деятельность человека пропускная способность ППС не может быть раскрыта с помощью единственной и простой числовой меры. Это многомерная концепция, подверженная систематическим усовершенствованиям и модификациям из-за внедрения технологических новшеств и изменения природоохранного законодательства под давлением жителей регионов [8].

Учитывая высокую степень взаимодействий между ресурсами и качеством среды обитания человека, а также связанный с ними характер социально-экономической активности, напрашивается вывод о необходимости поиска компромисса между уровнями производства – потребления, ресурсопользования, утилизацией отходов и возможностями оздоровления окружающей среды. С этих позиций пропускная способность ППС должна

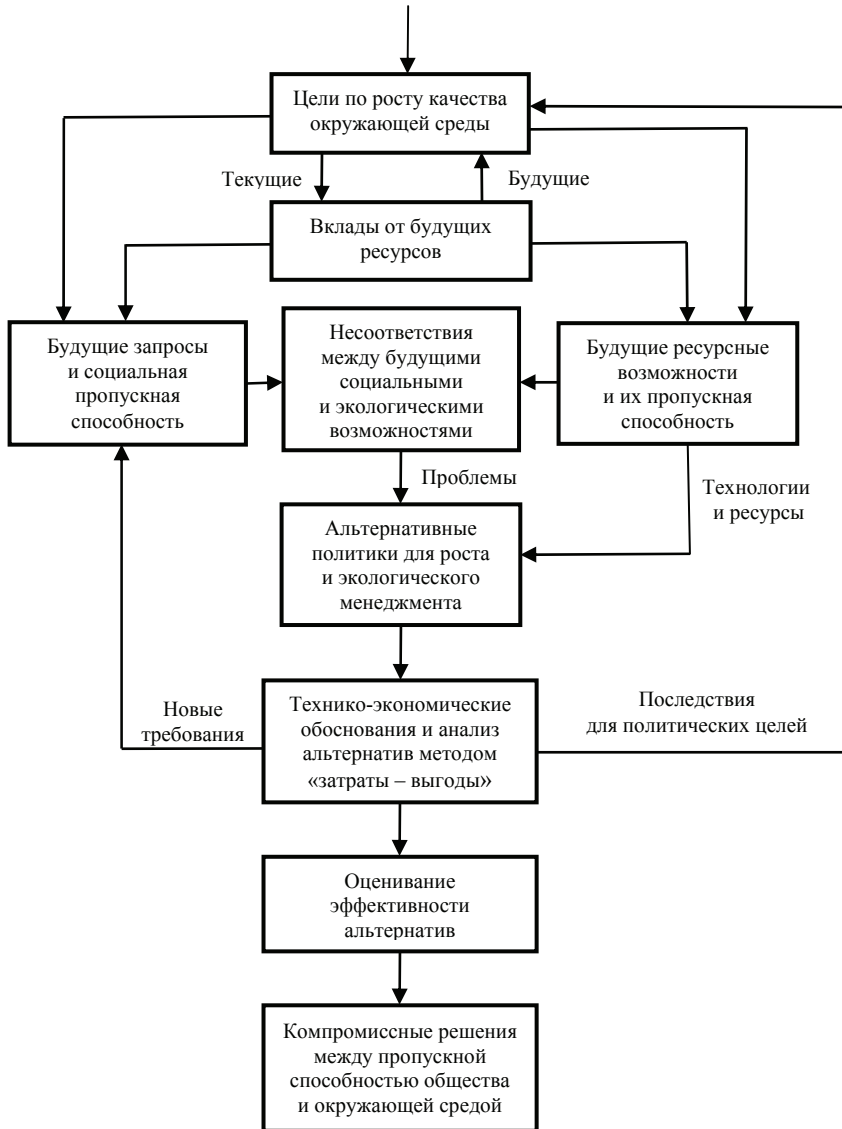
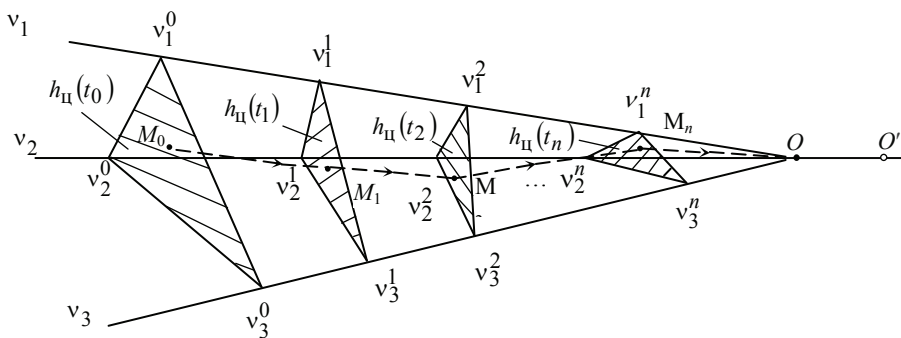


Рис. 1. Диаграмма операционных согласований пределов пропускной способности региона [8]



**Рис. 2. Движение ППС в направлении ЦУР [10]:**

$h(t_i)$  – состояние системы в  $i$ -й момент времени;  $M_i$  – центры «масс» состояний  $h(t_i)$ ;  
 - - - - траектория устойчивого развития

интерпретироваться как переменная с социальной основой внутри нашего понимания экономических, политических, экологических и социальных ценностей и их относительного вклада в достижение более высоких стандартов качества жизни. В таком варианте рабочее определение понятия «пропускная способность» предполагает серии операционных согласований пропускных пределов, связанных с уровнем качества природной среды и желательными темпами потребления ресурсов, товаров и услуг [8]. Блок-схема необходимых согласований приведена на рис. 1.

В данном контексте движение ППС по траектории устойчивого развития должно выстраиваться с учетом ее предельной пропускной способности. На рисунке 2 продемонстрирована возможная схема движения ППС к целям устойчивого развития (ЦУР) в трехмерной косоугольной системе координат [10]. Текущие состояния ППС характеризуются значениями отклонений экономических  $v_1$ , экологических  $v_2$  и социальных  $v_3$  индикаторов от соответствующих целевых заданий в моменты времени  $t_0, t_1, \dots, t_n$ .

На рисунке 2 вершина  $O$  символизирует состояние ППС, в котором достигаются ЦУР, точка  $O'$  – состояние системы на границе пропускной способности. Тогда  $[O - O']$  есть диапазон относительно стабильной работы системы, внутри которого она способна к достижению равновесных состояний. Такой диапазон можно назвать «запасом устойчивости» в развитии систем.

Для согласования пропускных пределов объектов и систем, образующих единое экономическое пространство регионов, необходимо в первую очередь уметь оценивать их пропускные способности. Одним из примеров таких систем являются городские очистные сооружения.

### **Задача оценки пропускной способности очистных сооружений**

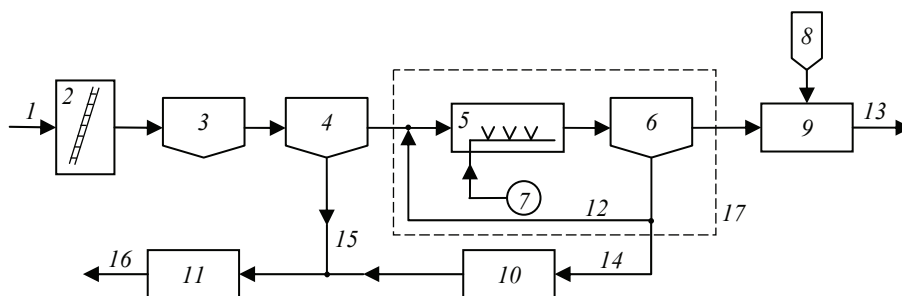
Согласно Постановлению Администрации г. Тамбова Тамбовской области от 13.09.2022 г. № 6403 «Об утверждении актуализированной схемы водоотведения г. Тамбова на период до 2030 г.», требуется модернизация существующих очистных систем канализации (ОСК). Являясь типичным примером городской инфраструктуры санитарно-бытового и экологического назначения, ОСК относятся к категории объектов с ограниченным (в данном конкретном случае) потенциалом пространственного расшире-

ния, отчего задача устойчивого развития требует модернизации всего устаревшего оборудования, замены на современное и размещения его на прежних площадях. Указанная задача возникла по причине ужесточения требований к очистке стоков от соединений азота и фосфора. После реализации плана модернизации ОСК период нормальной эксплуатации может составить не одно десятилетие, предопределяя качество жизни будущих поколений граждан согласно концепции устойчивого развития.

С момента принятия решений о модернизации и до ее осуществления обычно проходит много времени, отчего в этом периоде ОСК работают неэффективно, нанося экологический ущерб водным объектам. Знание предельных возможностей ОСК, их пропускной способности позволяет в самых неожиданных и сложных ситуациях (связанных с внезапным ростом потоков сточных вод, аварийными сбросами загрязнений, грядущими изменениями в законодательстве и т.п.) с большей надежностью определять тип и стоимость модернизационных изменений в технологиях и системах управления и своевременно осуществлять проектные изыскания. Для этого необходимо проводить согласования входной нагрузки с реальной пропускной способностью ОСК как на этапах проектирования новых, так и модернизации действующих очистных систем.

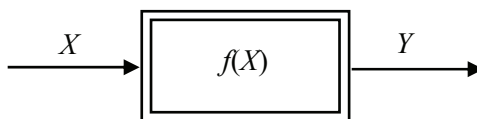
Базовой частью рассматриваемого комплекса ОСК являются городские очистные сооружения г. Тамбова, схема которых в варианте использования активного ила с подачей кислорода в коридорный аэротенк представлена на рис. 3.

Опуская подробности технологических новшеств в данном проекте модернизации ОСК, задачу об определении пропускной способности очистных сооружений будем анализировать в границах подсистемы «аэротенк – отстойник» (А – О), являющейся их основным ядром.



**Рис. 3. Схема комплекса очистных сооружений:**

1 – входной коллектор; 2 – механическая очистка; 3 – песколовка; 4, 6 – первичный и вторичный отстойники соответственно; 5 – аэротенк; 7 – воздуходувка; 8 – хлораторная; 9 – контактный резервуар; 10 – илоуплотнитель; 11 – метантенк; 12 – рецикл ила; 13 – выпускной коллектор; 14 – избыточный ил; 15 – сырой осадок; 16 – продукты метантенка; 17 – подсистема «аэротенк – отстойник» (А – О)



**Рис. 4. Подсистема «аэротенк – отстойник» в виде «черного ящика»**

Абстрагируясь при этом от внутреннего содержания подсистемы А – О, отобразим ее функционал в виде «передаточного звена» (см. рис. 4), где  $X$  и  $Y$  – множества входных и выходных переменных состояния водных потоков,  $f$  – оператор отображения  $X$  в  $Y$ .

Множество

$$X = G_{\text{вх}} \times C_{1\text{вх}} \times C_{2\text{вх}} \times \dots \times C_{n\text{вх}}, \quad (1)$$

где  $G_{\text{вх}}$  – множество значений расхода сточной воды;  $C_{i\text{вх}}$  – множества значений концентраций примесей  $i$ -го типа,  $i = \overline{1, n}$ ;  $\times$  – знак декартова произведения. Аналогично: множество  $Y = G_{\text{вых}} \times C_{1\text{вых}} \times C_{2\text{вых}} \times \dots \times C_{n\text{вых}}$ , где  $G_{\text{вых}}$  – множество значений расхода осветленной воды;  $C_{i\text{вых}}$  – множества остаточных значений концентраций примесей. Очевидно, что множество  $Y$  ограничено сверху нормативными значениями компонент  $g_{\text{вых}} \leq g_{\text{норм}} \in G_{\text{вых}}$  и  $c_{i\text{вых}} \leq c_{i\text{норм}} \in C_{i\text{вых}}$ , снизу – нулевыми значениями  $g_{\text{норм}}$  и  $c_{i\text{норм}}$ ,  $i = \overline{1, n}$ .

Используя отображение  $X \rightarrow Y = f(X)$ , выразим допустимую область значений вектора  $\mathbf{x} \in X$  в виде

$$X' = \{\mathbf{x}\} = \bigcup_{\mathbf{x} \in X} f^{-1}(\mathbf{y}(\mathbf{x}) \in Y), \quad (2)$$

где  $\mathbf{x}$  – вектор упорядоченных конечных последовательностей ( $g_{\text{вх}}$ ,  $C_{1\text{вх}}$ ,  $C_{2\text{вх}}$ , ...,  $C_{n\text{вх}}$ );  $X'$  – подмножество множества  $X$ ;  $f^{-1}$  – обратное отображение  $Y \rightarrow X$ ;  $Y$  – область существования  $f(X)$ ;  $\mathbf{y}(\mathbf{x})$  – вектор выходных значений, получаемых от реализации вектора  $\mathbf{x}$ . В задаче о пропускной способности подсистемы А – О требуется определить верхнюю границу множества  $X'$ .

В целях обеспечения стабильной работы очистных сооружений в условиях неопределенности поведения компонент вектора  $\mathbf{x}$  типовое проектирование или модернизация ОСК осуществляется на основе прогнозируемых изменений входного потока сточной воды и концентраций примесей, в числе которых взвешенные вещества, БПК<sub>5</sub>, ХПК, общий азот, общий фосфор, аммонийный азот и фосфор фосфатов. Согласно СП 32.13330.2018 для расчетов используют ретроспективные многолетние данные 85%-го и выше перцентилей со среднемаксимальными часовыми и суточными нагрузками на очистные сооружения, а также оценочную информацию о водоотведении в предполагаемом периоде времени и сведения о возможных изменениях инфильтрации воды [12]. Кроме того, в расчетах используют значения температуры сточных вод в летний и зимний периоды, поскольку от нее зависит приток сточных вод и скорость процессов биоокисления в аэротенке.

Очевидно, что пропускная способность очистных сооружений является сложной функцией конструктивных параметров аппаратов, состояния входного потока и режима эксплуатации. Поэтому реальная пропускная способность может существенно отличаться от проектной, что указывает

на необходимость оценки именно предельных возможностей подсистемы А – О. При этом надо различать два вида пропускных способностей: 1 – гидравлическую, определяемую потерей напора сточной воды на разных стадиях ее последовательного движения и обработки; 2 – процессную, связанную с реализацией био-физико-химических процессов очистки воды от примесей.

Учитывая данные обстоятельства, задачу оценивания пропускной способности рассмотрим в двух вариантах. В первом из них входную нагрузку представим в виде вектора

$$\mathbf{v}_{\text{вх}} = \mathbf{g}_{\text{вх}}^T C_{\text{вх}}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{g}_{\text{вх}}^T$  – вектор-строка значений расхода;  $C_{\text{вх}}$  – матрица концентраций, определяемых (1);  $t$  – знак транспонирования. Описание процесса очистки запишем в упрощенном виде

$$\mathbf{y}_{i_{\text{вых}}} = \varphi_{\omega}(K, \mathbf{v}_{\text{вх}}, \mathbf{S}, T^v, \text{pH}, \mathbf{u}^0), \quad (4)$$

где  $\varphi_{\omega}$  – модель процесса очистки воды в варианте модернизации ОСК  $\omega \in \Omega$ ;  $\Omega$  – множество рассматриваемых вариантов;  $K$  – конструктивные параметры модернизированной подсистемы;  $\mathbf{v}_{\text{вх}}$  – входная нагрузка;  $\mathbf{S}$  – концентрации основных групп микроорганизмов активного ила, осуществляющих очистку воды от примесей;  $T^v$  – температура воды в летний ( $v = 1$ ) и зимний ( $v = 2$ ) периоды работы подсистемы А – О;  $\text{pH}$  – водородный показатель;  $\mathbf{u}^0$  – оптимальные значения управлений подсистемой А – О в варианте  $\omega$ .

Целевую функцию задачи запишем в виде

$$Q(\mathbf{v}_{\text{вх}}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^M \left( \frac{y_i^j_{\text{норм}} - y_i^j_{\text{вых}}(\mathbf{v}_{\text{вх}})}{y_i^j_{\text{норм}}} \right)^2, \quad (5)$$

где под знаком сумм находится квадрат относительных отклонений расчетных значений выходных переменных от максимально допустимых,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, M}$ . Смысл использования функции (5) состоит в необходимости приближения пропускной способности подсистемы А – О к верхней границе множества  $Y$  при соответствующем выборе значений нагрузки  $\mathbf{v}_{\text{вх}}$ . Индекс  $j = \overline{1, M}$  обозначает номера вариантов  $\mathbf{v}_{\text{вх}}$ , задаваемых в модели (4),  $M$  – достаточно большое число.

Постановку задачи сформулируем следующим образом. На множестве рассматриваемых вариантов модернизации подсистемы А – О,  $\omega \in \Omega$ , найти такие значения предельной нагрузки  $\mathbf{v}_{\text{вх}}^*$ , при которых достигает минимума целевая функция (5),

$$\mathbf{v}_{\text{вх}}^* = \arg \min_{\mathbf{v}_{\text{вх}} \in U} Q(\mathbf{v}_{\text{вх}}), \quad (6)$$

выполняется условие (4) и при этом оптимальные значения управлений  $\mathbf{u}^0$  принадлежат множеству допустимых решений  $U$

$$\mathbf{u}^0 \in U, \quad (7)$$

водородный потенциал рН находится в ограничениях

$$\text{pH}_{\min} \leq \text{pH} \leq \text{pH}_{\max}, \quad (8)$$

а температура воды соответствует значениям:

$$T = T^1 \text{ и } T = T^2, \quad (9)$$

характерным для летнего и зимнего сезонов рассматриваемого региона. Заметим, что в (6)  $V$  – открытое множество решений.

Поскольку решение задачи (5) – (9) рассматривается при оптимальных значениях управлений  $\mathbf{u}^0$ , данную задачу назовем «внешней», а задачу нахождения  $\mathbf{u}^0$  – «внутренней». Постановку внутренней задачи сформулируем следующим образом: для заданных значений  $\mathbf{v}_{\text{ВХ}}^j$ ,  $j = \overline{1, M}$ , найти такие значения управляющих воздействий  $\mathbf{u}^0$  (подачу кислорода воздуха и расход ила в рецикле), при которых критерий эффективности очистки сточных вод

$$I^j(\mathbf{u}^0) = \max_{\mathbf{u} \in U} \sum_{i=1}^n \left( \frac{y_i^j \text{ВХ} - y_i^j \text{ВЫХ}(\mathbf{u})}{y_i^j \text{ВХ}} \right)^2, \quad (10)$$

выполняются условия (4), (9) и ограничения (7), (8).

Таким образом, на каждом  $j$ -м прогоне  $\mathbf{v}_{\text{ВХ}}^j$  во внешней задаче первоначально должна решаться внутренняя.

Ранее отмечалось, что существуют два типа пропускной способности в подсистеме А – О: гидравлическая и процессная. Первая связана с потерей напора воды при движении ее через аппараты, вторая – с кинетикой процессов биоокисления в аэротенке и осаждения ила в отстойнике. Обе компоненты входной нагрузки (расход воды и концентрация примесей) не связаны явно между собой, поэтому могут рассматриваться в бинарных сочетаниях: А(–, –), В(–, +), С(+, –), D(+, +), где знаки минус и плюс символизируют низкие и высокие уровни значений расхода и концентраций примесей.

В реальности же часто наблюдается синхронное поведение этих компонент по причине действия внешних и внутренних факторов, от которых они зависят: суточных изменений хозяйственной активности горожан, сезонных изменений метеоусловий, специфических особенностей процессов очистки. В задаче о пропускной способности интерес вызывает состояние D(+, +), в котором обе компоненты должны находиться на максимальных уровнях. Однако высокое значение расхода ограничено не только конструктивными особенностями аппаратов, но и возможным вымыванием ила из отстойника, а повышение концентраций примесей требует увеличения массы ила, что также отразится на работе отстойника. Таким образом, обе

входные компоненты оказываются конкурирующими через технологию работы подсистемы А – О. Поэтому вопрос о предельной пропускной способности должен решаться на компромиссной основе.

Постановку задачи во втором варианте будем рассматривать как би-критериальную: необходимо найти такие значения  $g_{\text{вх}}^*$  и  $c_{\text{вх}}^*$ , при которых векторный критерий входной нагрузки

$$R(g_{\text{вх}}^*, c_{\text{вх}}^*) = \max_{\substack{g_{\text{вх}} \in \hat{G}_{\text{вх}} \\ c_{\text{вх}} \in C_{\text{вх}}}} R(g_{\text{вх}}, c_{\text{вх}}), \quad (11)$$

при условиях (4), (9), оптимальных значениях управлений (7), ограничениях (8) и ограничениях на значения концентраций примесей  $c_i$  в осветленном потоке воды

$$c_i \leq c_{i\text{норм}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (12)$$

где  $c_{i\text{норм}}$  – нормативное значение  $i$ -й концентрации.

Множество допустимых значений входных концентраций определяется декартовым произведением  $C_{\text{вх}} = C_{1\text{вх}} \times C_{2\text{вх}} \times \dots \times C_{n\text{вх}}$ . При этом решение внутренней задачи проводится в постановке, характерной для первого варианта.

### Заключение

Определение пропускной (несущей) способности ППС необходимо проводить на этапах проектирования и модернизации их промышленных и экологических подсистем в целях обеспечения эффективного контроля за устойчивостью социально-экономических процессов в регионах РФ.

Концепция пропускной способности в проблеме устойчивого развития является многомерной. На примере ОСК показано, что такая концепция является двойственной – гидравлической и процессной.

Классы задач о пропускной способности относятся к категории обратных, решение которых возможно прямыми методами, основанными на оптимизации некоторого целевого функционала.

#### Список литературы

1. Одум, Ю. Экология : пер. с англ. = Ecology / Ю. Одум. В 2-х томах. – М. : Мир, 1986. – Т. 2. – 376 с.
2. ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. – Введ. 2015–07–01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 15 с.
3. ГОСТ Р 27.102–2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. – Введ. 2022–01–01. – М. : Российский институт стандартизации, 2021. – 36 с.
4. Баламутова, А. А. Диагностика состояний функционирования объектов региональной экономики в проблеме устойчивого развития / А. А. Баламутова, Н. С. Попов, А. В. Андреев // Вестник Тамб. гос. техн. ун-та. – 2023. – Т. 29, № 1. – С. 75 – 90. doi: 10.17277/vestnik.2023.01.pp.075-090
5. Шеннон, К. Э. Работы по теории информации и кибернетике : сб. ст. ; пер. с англ. / К. Э. Шеннон ; под ред. Р. Л. Добрушина и О. Б. Лупанова. – М. : Изд-во иностр. лит-ры, 1963. – 830 с.

6. Ожегов, С. И. Словарь русского языка / С. И. Ожегов ; под ред. Н. Ю. Шведовой. – М. : Русский язык, 1990. – 921 с.
7. Кафаров, В. В. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов. – М. : Наука, 1976. – 500 с.
8. Carrying Capacity in Regional Environmental Management / A. B. Bishop, H. H. Fullerton, A. B. Crawford, M. D. Chambers, M. McKee // Socioeconomic Environmental Studies Series. EPA 600/5-74-021. February, 1974. – 171 p.
9. Баламутова, А. А. Пространственное измерение в проектах устойчивого регионального развития / А. А. Баламутова, Н. С. Попов, Л. Н. Чуксина // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2023. – № 2 (88). – С. 38 – 53. doi: 10.17277/voprosy.2023.02.pp.038-053
10. Попов, Н. С. О некоторых особенностях в постановке и решении региональных задач устойчивого развития. Часть IV / Н. С. Попов, О. В. Милованова, А. А. Баламутова, Л. Н. Чуксина // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2022. – № 1 (83). – С. 46 – 62. doi: 10.17277/voprosy.2022.01.pp.046-062
11. Милованова, О. В. Интегрированное проектирование объектов и систем управления в проблеме регионального устойчивого развития / О. В. Милованова, Н. С. Попов, А. А. Баламутова // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2021. – № 1 (79). – С. 7 – 25. doi: 10.17277/voprosy.2021.01.pp.007-025.
12. СП 23.1330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения. СНиП 2.04.03-85. – Текст : электрон. – URL.: <https://docs.cntd.ru/document/554820821> (дата обращения: 17.02.2021).

#### References

1. Odum E. *Ekologiya* [Ecology]: trans. from English, in 2 vols., Moscow: Mir, 1986, vol. 2, 376 p. (In Russ.)
2. GOST 27751-2014. *Nadezhnost' stroitel'nykh konstruksii i osnovaniy* [Reliability of building structures and foundations], Moscow: Standartinform, 2019, 15 p. (In Russ.)
3. GOST R 27.102-2021. *Nadezhnost' v tekhnike. Nadezhnost' ob"yekta. Terminy i opredeleniya* [Reliability in technology. Reliability of the object. Terms and Definitions], Moscow: Rossiyskiy institut standartizatsii, 2021, 36 p. (In Russ.)
4. Balamutova A.A., Popov N.S., Andreyev A.V. [Diagnostics of the states of functioning of regional economic objects in the problem of sustainable development], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2023, vol. 29, no. 1, pp. 75-90. doi: 10.17277/vestnik.2023.01.pp.075-090 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Shannon K.E.; Dobrushin R.L. and Lupanov O.B. (Eds.) *Raboty po teorii informatsii i kibernetike* [Works on information theory and cybernetics: collection of articles]: trans. from English, Moscow: Izdatel'stvo inostr. littratury, 1963, 830 p. (In Russ.)
6. Ozhegov S.I.; Shvedova N.Yu. (Ed.). *Slovar' russkogo yazyka* [Dictionary of the Russian language], Moscow: Russkiy yazyk, 1990, 921 p. (In Russ.)
7. Kafarov V.V., Dorokhov I.N. *Sistemnyy analiz protsessov khimicheskoy tekhnologii. Osnovy strategii* [System analysis of chemical technology processes. Fundamentals of strategy], Moscow: Nauka, 1976, 500 p. (In Russ.)
8. Bishop A.B., Fullerton H.H., Crawford A.B., Chambers M.D., McKee M. Carrying Capacity in Regional Environmental Management, *Socioeconomic Environmental Studies Series*. EPA 600/5-74-021. February, 1974, 171 p.
9. Balamutova A.A., Popov N.S., Chuksina L.N. [Spatial dimension in projects of sustainable regional development], *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky

University], 2023, no. 2(88), pp. 38-53. doi: 10.17277/voprosy.2023.02.pp.038-053 (In Russ., abstract in Eng.)

10. Popov N.S., Milovanova O.V., Balamutova A.A., Chuksina L.N. [About some features in the formulation and solution of regional problems of sustainable development. Part IV], *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2022, no. 1(83), pp. 46-62. doi: 10.17277/voprosy.2022.01.pp.046-062 (In Russ., abstract in Eng.)

11. Milovanova O.V., Popov N.S., Balamutova A.A. [Integrated design of objects and management systems in the problem of regional sustainable development], *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2021, no. 1(79), pp. 7-25. doi: 10.17277/voprosy.2021.01.pp.007-025. (In Russ., abstract in Eng.)

12. <https://docs.cntd.ru/document/554820821> (accessed 17 February 2021).

---

## On the Problem of the Capacity of Natural-Industrial Systems

A. A. Balamutova, N. S. Popov, A. I. Anokhin, L. N. Chuksina

*Tambov State Technical University, Tambov, Russia;*

*Voronezh State University, Voronezh, Russia*

*Derzhavin Tambov State University, Tambov, Russia*

**Keywords:** wastewater treatment plants; limit conditions; natural-industrial systems; capacity; regional economy; systems approach; sustainable development.

**Abstract:** The concept of the capacity of natural-industrial systems is a reliable way to understand the reasons for the unsustainable behavior of regional economic objects. Elimination of the disproportion between the real capabilities of the region's resource base, its economic activity and environmental quality in the problem of sustainable development is facilitated by methods for finding compromise solutions. A scientific approach to coordinating the load on treatment plants with their maximum capacity is proposed.

---

© А. А. Баламутова, Н. С. Попов,  
А. И. Анохин, Л. Н. Чукукина, 2023