

# КОНЦЕПЦИЯ ВИРТУАЛЬНОГО ПОЛИГОНА ОТРАБОТКИ РЕГЛАМЕНТОВ СБРОСОВ ПРЕДПРИЯТИЙ-ПРИРОДОПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ В ВОДНЫЙ БАССЕЙН

Соколов В.В., Дружинин Ю.О.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва*  
sok@ipu.ru, ydruzhin@ipu.ru

*Аннотация:* Рассматривается методика составления расписания сбросов сточных вод предприятий-водопользователей, обеспечивающего предельно допустимую концентрацию загрязняющих веществ в водном бассейне.

Ключевые слова: мониторинг, распределенная управляющая система, статическое расписание, рациональное водопользование.

В настоящее время в нашей стране активно продвигается концепция систем мониторинга качества [1] и управления качеством [2] природных поверхностных вод. Эта концепция учитывает существующую методику составления регламентов сбросов загрязняющих веществ (ЗВ) предприятиями-водопользователями в водный бассейн. Ключевыми расчетными параметрами методики являются нормативы допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользования (НДС), выводимые из предельно допустимых концентраций (ПДК).

Известен ряд подходов к решению экологических задач, возникающих при составлении регламентов сбросов предприятий-природопользователей в водный бассейн. Для формирования модели водного объекта водоток разбивается на секции с постоянным расходом, в пределах которых все параметры модели можно принять постоянными, границы секций совмещаются с местами сброса сточных, в том числе и дренажных вод, водозаборами, устьями притоков, створами, в которых контролируется качество воды, и местами резкого изменения гидрометрических характеристик водотока. При совпадении места водозабора с местом сброса сточных, в том числе дренажных вод или устьем притока для этого водозабора вводится отдельная секция нулевой протяженности. Для каждого притока и основной реки помимо створов контроля качества воды указывается расчетный створ в устье и начальный створ и качество воды в истоке реки. Все створы нумеруются последовательно от истока к устью для каждого притока и основной реки. Аналогично нумеруются расчетные секции. Речная система представляется как ориентированный (в общем случае многостадийный) граф с вершинами или узлами, соответствующих местам сброса сточных, в том числе и дренажных вод, водозаборами, устьями притоков, створами, в которых контролируется качество воды, и местами резкого изменения гидрометрических характеристик водотока.

Большинство регламентов рассчитано на непрерывный сброс ЗВ предприятиями-природопользователями, что приводит к перемешиванию их стоков. В перемешанных таким образом стоках разных ЗВ, даже в случае их концентраций, много меньших предельно допустимых, могут протекать реакции, в результате которых возможно появление непредсказуемых ядовитых или канцерогенных веществ.

Предприятия-природопользователи представляют собой точечные источники сбросов ЗВ. Для них характерна регулярность и их можно рассматривать как стационарные. Они фиксированы на местности, а нагрузки ЗВ оцениваются по непосредственным замерам, известным технологиям производства и т.д. Качество воды в заданном сечении водотока определяется суммарной нагрузкой от совокупности источников, объемов потока воды и последующего разбавлением и распада загрязняющих веществ в условиях установившегося течения. При преобладании на водосборе точечных источников концентрация ЗВ в водном объекте является гиперболической функцией потока, так как концентрация ЗВ в потоке сокращается при увеличении объема протекающей воды за счет разбавления.

**Постановка задачи:** имеется водный бассейн речной системы, представленный ориентированным графом  $D = (V, E)$ , имеющим  $N$  вершин ( $N = |V|$ ), из которых  $N_1$  соответствуют устьям притоков,  $N_2$  – местам сброса сточных, в том числе и дренажных вод предприятий-водопользователей (точечных источников ЗВ),  $N_3$  – точкам водозабора. Каждое ребро  $\{u, v\} \in E$ , ( $u, v \in V$ ) соответствует отрезку реки и характеризуется средней скоростью потока  $\bar{v}_i$ , средней площадью сечения  $\bar{S}_i$  и длиной  $l_i$ .

Требуется составить такое расписание сбросов ЗВ для  $N_2$  предприятий-водопользователей, по всем типам ЗВ, массой  $G_{ik}$  ( $i \in (1, N_2), k \in (1, K)$ ), чтобы в каждой из  $N_3$  точек водозабора для концентрации  $k$  – го ЗВ выполнялось условие:

$$(1) c_{ik} < c_{kmax}; i \in (1, N_2), k \in (1, K)$$

где  $c_{ik}$  – концентрация  $k$  – го ЗВ от  $i$  – го предприятия-водопользователя,  $c_{kmax}$  – предельно допустимая концентрация  $k$  – го ЗВ.

Вводим дополнительные ограничения: 1) консервативный характер ЗВ, которые подвергаются только разбавлению; 2) запорные устройства обеспечивают сброс ЗВ со скоростью течения реки и в объемах, соответствующих  $c_{kmax}$ .

Параметром оптимизации является период времени  $T$ , в течение которого будет осуществляться воздействие на бассейн реки допустимой, с точки зрения экологии, суммарной массы ЗВ  $G$ :

$$(2) G = \sum_{i=1}^{N_2} \sum_{k=1}^K G_{ik}; i \in (1, N_2), k \in (1, K)$$

Допустимая масса одного ЗВ  $G_{ik}$  в сбросе расположенного выше по течению предприятия-водопользователя составит:

$$(3) G_{ik} = c_{kmax} l_i \bar{S}_i,$$

где  $l_i$  расстояние между двумя предприятиями-водопользователями или предприятием-водопользователем и местом водозабора,  $\bar{S}_i$  – среднее сечение данного водного отрезка, и  $c_{kmax}$  ПДК для ЗВ  $k$ -го типа.

Чтобы избежать увеличения концентрации веществ при сложении сбросов ЗВ от нескольких предприятий-водопользователей, расположенных на одной реке (или ее притоке), выпуски их должны быть упорядочены во времени. Это означает, что сброс ЗВ на расположенном ниже по реке предприятия, должен быть завершен до того, как на его створе появятся ЗВ с предприятий, расположенных выше по течению. Это предприятие может начать сброс ЗВ и после транзита ЗВ с расположенных выше предприятий.

Это может быть достигнуто при наличии на предприятиях резервуаров, достаточных для временного хранения ЗВ, и специальной запорной арматуры, управляемой распределенной системой, работающей по статическому расписанию.

Такое расписание составляется в нескольких вариантах в зависимости от времени года. Данная распределенная управляющая система должна также быть составной частью (подсистемой) системы мониторинга состояния объекта (участка или всего бассейна реки). Это позволит оперативно реагировать на внешние воздействия (изменение метеорологических условий, аварии и т.д.).

Цикл воздействия загрязнений на водный бассейн состоит из двух этапов:

- собственно сброс ЗВ предприятиями-водопользователями;
- прохождение ЗВ по всей длине водного бассейна.

Длительность однократного воздействия на речной бассейн при последовательном сбросе ЗВ в  $N_2$  предприятиями-водопользователями  $T$ , при соблюдении условий (1-2), составляет:

$$(4) T = T_1 + T_2,$$

где  $T_1$  – суммарное время сброса ЗВ предприятиями-водопользователями,  $T_2$  – время прохождения ЗВ по всей речной системе.

В этом случае суммарное время сброса ЗВ составит:

$$(5) T_1 = \sum_{i=1}^{N_2} t'_i,$$

где  $t'_i$  – время заполнения  $i$ -ого отрезка реки (между  $i$ -м и  $i + 1$ -м источниками ЗВ) без учета притоков.

Так как на  $i$ -ом отрезке реки могут находиться  $M_i$  участков длиной  $l_{mi}$  каждый, отличающиеся своими характеристиками и, прежде всего скоростью течения  $\bar{v}_{mi}$ , то получим:

$$(6) t'_i = \sum_{mi=1}^{M_i-1} \frac{l_{mi}}{\bar{v}_{mi}}; l_i = \sum_{mi=1}^{M_i-1} l_{mi}$$

Время прохождения всей массы растворенных ЗВ в виде последовательных объемов воды с допустимой концентрацией этих веществ от истоков до устья составит:

$$(7) T_2 = \sum_{i=1}^{N_2} t_i$$

где  $t_i$  – время транзита по  $i$ -му отрезку реки.

Таким образом, согласно (4) длительность однократного воздействия  $T$  при последовательном сбросе ЗВ предприятиями-природопользователями будет равна удвоенному времени прохождения ЗВ по реке.

На время прохождения ЗВ по речной системе  $T_2$  влияют преимущественно природные факторы. Воздействовать на него можно только путем изменения режима работы гидротехнических сооружений (например, спуск воды в водохранилище и т.д.).

В тоже время уменьшение времени прохождения  $T$  при циклическом возможно как за счет организации параллельного сброса ЗВ, так и путем конвейеризации самого процесса.

При линейном расположении на отрезке реки  $N_2$  предприятий-водопользователей, осуществляющих параллельный слив ЗВ, длительность однократного воздействия  $T$  всей массы ЗВ составит:

$$(8) T = \max(t'_i) + \sum_{i=1}^{N_2} t_i$$

где  $\max(t'_i)$  – максимальное время заполнения ЗВ заданной концентрации  $i$  - го участка реки.

Для нас главный интерес представляет, однако, циклический сброс ЗВ, где  $T^*$  характеризует период между сбросами на одном предприятии. В этом случае однократный сброс ЗВ характеризует первый цикл (цикл инициализации) конвейерного алгоритма, после чего каждое предприятие осуществляет сброс ЗВ с периодом:

$$(9) T^* = \sum_{i=1}^{N_2} t_i$$

где  $t_i$  – время транзита по  $i$ -му отрезку реки.

Сформулируем теперь задачу в терминах теории расписаний. Обозначения возьмем из работы [3]. Требуется выполнить множество  $N_2 = \{1, 2, \dots, n\}$  заданий. Для каждого задания  $i \in N_2$  определены длительность выполнения  $p_i > 0$ , время поступления задания  $r_i \geq 0$ , крайние директивные сроки не заданы ( $D_i = +\infty, i = 1, 2, \dots, N_2$ ). Прерывания при выполнении заданий запрещены. Для каждого требования  $i \in N_2$  определяется момент начала выполнения  $S_i$  такой  $S_i \geq r_i$ , и момент окончания выполнения задания  $C_i = S_i + p_i$ . Необходимо построить допустимое расписание, при котором значение функции  $\sum_{i=1}^{N_2} C_i$  будет минимальным, а все условия задачи соблюдены. В нашем случае  $S_i = r_i$ , а  $p_i = t_i$ .

Для всех  $N_2$  предприятий-водопользователей вычисляем время прохождения ЗВ через  $i$  -й участок реки. Оно состоит из времени заполнения ЗВ заданной концентрации участка до расположенного ниже по течению предприятия ( $t'_i$ ), а также времени транзита ЗВ по данному участку ( $t_i$ ). При последовательном спуске ЗВ ( $t'_i = t_i$ ) оно составит  $2t_i$ . Тогда расписание сливов ЗВ для линейного участка реки (без притоков) при однократном воздействии (или при инициализации системы) будет следующим

$$(10) \left\{ \begin{array}{l} S_1(j) = 0 \\ S_2(j) = C_1(j) = S_1(j) + 2t_1 \\ \dots \\ S_i(j) = C_{i-1}(j) = S_{i-1}(j) + 2t_{i-1} \\ \dots \\ S_{N_2}(j) = C_{N_2-1}(j) = S_{N_2-1}(j) + 2t_{N_2-1} \end{array} \right. , \quad j = 1$$

При конвейерной организации слива, когда следующий слив ЗВ начинается через  $T^*$  (9) одновременно с продолжающимся продвижением объемов ЗВ предыдущего слива (10):

$$(11) \left\{ \begin{array}{l} S_1(j) = (j-1)T^* \\ S_2(j) = C_1(j) = S_1(j) + t_1 \\ \dots \\ S_i(j) = C_{i-1}(j) = S_{i-1}(j) + t_{i-1} \\ \dots \\ S_{N_2}(j) = C_{N_2-1}(j) = S_{N_2-1}(j) + t_{N_2-1} \end{array} \right. , \quad j \in (2, \infty)$$

где  $j$  – номер цикла сброса,  $S_i(j), C_i(j)$  – времена начала и завершения слива ЗВ для  $i$ -го источника ЗВ, в  $j$ -м цикле.

Однако граф, описывающий топологию реального речного бассейна, имеет древовидную структуру. В таком графе смежные дуги (ориентированные ребра) отображают соединяющиеся водные потоки. При этом эти дуги нагружены характеристиками потоков (скорость потока  $\bar{v}_i$ , средняя площадь сечения участка реки  $\bar{S}_i$ , длина участка  $l_i$ ). Тогда дугу, описывающую участок меньшей длины, считаем притоком, а смежную с ней дугу – главным потоком.

Если приток реки не содержит ЗВ, то в основном потоке формируется участок, в котором, начиная со створа притока, изменяются характеристики отрезка реки: скорость потока  $\bar{v}_i$ , средняя площадь сечения участка реки  $\bar{S}_i$ , что влияет на время прохождения ЗВ через данный участок  $t_i$ .

Если приток имеет источники ЗВ, то сначала пропускаем ЗВ главного потока, рассчитанные по формулам (3-6), а затем сливаем ЗВ притока (рис. 1.).

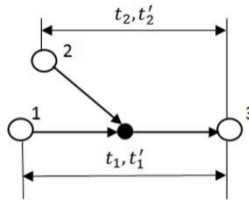


Рис. 1. Слияние двух потоков. 1, 2, 3 – источники ЗВ,  $t_1, t_2$  – время слива, равное времени прохождения загрязнения между 1 и 3, 2 и 3 источниками ЗВ ( $t_1 > t_2$ )

Для синхронизации времен завершения прохождения объема ЗВ по главному руслу и начала поступления ЗВ из притока, запрос на слив притока должен осуществляться с задержкой, равной времени заполнения сбросами ЗВ объема притока (при условии  $t'_i = t_i$ ):

$$(12) \left\{ \begin{array}{l} S_1 = 0 \\ C_1 = S_1 + 2t_1 \\ S_2 = C_1 - t_2 = S_1 + 2t_1 - t_2 \\ C_2 = S_2 + 2t_2 \end{array} \right.$$

где  $S_1, S_2$  – начало выполнения запросов на слив источников ЗВ, находящиеся соответственно на главном русле и притоке,  $C_1, C_2$  – завершение выполнения запросов на слив,  $t'_1, t'_2$  – время собственно слива ЗВ  $t_1, t_2$  – время прохождения ЗВ по главному руслу и притоку (при последовательном сливе  $t'_1 = t_1, t'_2 = t_2$ ).

Если два потока, один из которых является фрагментом главного потока, начинающегося в момент времени  $S_1$ , с  $n_1$  источниками ЗВ, а второй поток, начинающегося в момент времени  $S_2$ , содержит  $n_2$  источника, то первым пропускается слив фрагмента главного потока (или больший слив), а за ним следует слив ЗВ притока:

$$(13) \left\{ \begin{array}{l} S_{n_1} = S_1 + 2 \sum_{i=1}^{n_1-1} t_i \\ C_{n_1} = S_1 + 2 \sum_{i=1}^{n_1} t_i \\ S_{n_2} = C_{n_1} - t_{n_2} \\ S_2 = S_1 + (2 \sum_{i=1}^{n_1} t_i - \sum_{i=1}^{n_2} t_i) = S_1 + \Delta_{12} \end{array} \right.$$

Используя выражения (11–13) можно построить расписание для всех источников ЗВ речного бассейна, структура которого описана графом (рис. 2). При конвейерной организации алгоритма сброса ЗВ, соответствующий период  $T^*$  будет описываться выражением (9). То есть  $T^*$  равен продолжительности прохождения загрязнением всех участков реки, вне зависимости от того, находятся ли они на главном русле или притоках.

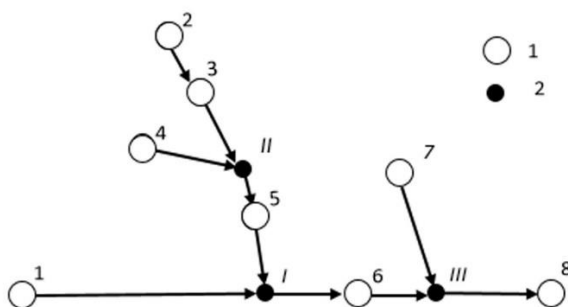


Рис. 2. Пример графа описания речного бассейна (1 – источники загрязнения, 2 – устья притоков).

Итоговый алгоритм:

1. Представить речной бассейн в виде ориентированного графа (дерева), узлами которого являются створы источников загрязнения, пунктов водозабора, устьев притоков. Водозаборы, расположенные выше по течению ближайших к истоку источников ЗВ, исключаются из рассмотрения.

2. Провести разметку узлов графа. Для этого найти наиболее длинный путь от устья к одной из вершин – источнику ЗВ. Данной вершине присваивается значение 1.

3. Следующие номера присвоить источникам ЗВ, расположенным на данном пути ниже по течению.

4. Если на главном пути встретится устье притока, то в соответствующем подграфе вновь находится наиболее длинный путь до конечной вершины. Данной вершине присваивается текущий номер.

5. Повторять пункты 3 и 4 до тех пор, пока все вершины подграфа не будут размечены.

6. Затем возвратиться на главный путь и повторять пункты 3–5 до тех пор, пока все вершины графа не будут размечены.

7. Вершина 1 принимается за начало расписания.

8. В соответствии с разметкой в порядке возрастания номеров источников загрязнения построить расписания слива загрязнений, используя формулы (11–13). При слиянии фрагментов в (13) подставляются номер начального источника ЗВ фрагмента главного потока и номер начального источника ЗВ притока.

9. При необходимости скорректировать расписания притоков.

Пример расписания сбросов ЗВ для графа на рис. 2:

$$(14) \left\{ \begin{array}{l} S_1 = 0 \\ S_2 = S_1 + (2t_{16} - (t_{23} + t_{35} + t_{56})) = S_1 + \Delta_{12} \\ S_3 = S_2 + 2t_{32} \\ S_4 = S_2 + (2(t_{23} + t_{35}) - t_{45}) = S_1 + \Delta_{12} + \Delta_{24} \\ S_5 = S_4 + 2t_{45} \\ S_6 = S_5 + 2t_{56} \\ S_7 = S_4 + (2(t_{45} + t_{56} + t_{68}) - t_{47}) = S_1 + \Delta_{12} + \Delta_{24} + \Delta_{47} \\ S_8 = S_7 + 2t_{78} \end{array} \right.$$

Алгоритмы создавались с точки зрения максимальной допустимой нагрузки на бассейн реки. Поэтому все циклы выполнения идентичны. Если заводы-водопользователи имеют потребности большие или меньшие расчетных величин, можно изменять величины сбросов ЗВ от цикла к циклу. Это означает, что потребуются перерасчет в каждом новом цикле.

При необходимости модель может быть загрублена, то есть в ней будут учитываться только крупные предприятия, вносящие наибольший вклад в загрязнение речного бассейна.

Предложенные алгоритмы могут быть применены и для построения расписаний сброса ЗВ внутри самого предприятия-водопользователя, имеющего сложную систему трубопроводов.

Для моделирования процесса загрязнения написана программа на языке Delphi. В дальнейшем она будет расширена за счет учета ряда факторов (седиментации, грунтовых вод и т.д.).

### **Литература**

1. *Баренбойм Г.М., Венецианов Е.В., Авандеева О.П. и др.* Научные основы создания систем мониторинга качества природных поверхностных вод. М.: Научный мир, 2016. – 462 с.
2. *Степановская И.А., Авандеева О.П.* Цифровой подход к управлению качеством поверхностных вод / Труды 11-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2018, Москва). М.: ИПУ РАН, 2018. Т.2. С. 239-245.
3. *Лазарев А.А., Гафаров Е.Р.* Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. М.: Издательство МГУ им. М.В. Ломоносова, 2011. – 222 с.