

DOI:

СОСТАВЛЕНИЕ РАСПИСАНИЙ ЦИКЛОВ ПЕРЕМЕННЫХ ПО ОБЪЕМУ СБРОСОВ ПРЕДПРИЯТИЙ-ПРИРОДОПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ В ВОДНЫЙ БАССЕЙН

Дружинин Ю.О., Соколов В.В.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва

ydruzhin@ipu.ru, sok@ipu.ru

Аннотация: Рассматривается методика коррекции расписания сбросов сточных вод предприятиями-водопользователями, обеспечивающего предельно допустимую концентрацию загрязняющих веществ в водном бассейне с учётом фактических потребностей предприятий-водопользователей..

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

В работе [1] предлагалась методика составления расписания сбросов сточных вод предприятиями-водопользователями, оптимального с точки зрения экологии. При этом не учитывались фактические потребности предприятий-водопользователей в сбросе некоторой массы загрязняющих веществ (ЗВ) за фиксированный промежуток времени (например, за сутки). Кроме того, предполагалось, что разбавление ЗВ до максимально допустимой концентрации, происходило только на отрезке реки между двумя предприятиями-водопользователями. Рассмотрим новую постановку данной задачи.

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 и дренажных вод предприятий-водопользователей (точечных источников ЗВ), N_3 – точкам бифуркации, N_4 – устьям реки. 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 .

При этом каждому из N_2 предприятий-водопользователей требуется за период T сбрасывать ЗВ K типов суммарной массой G_i , где

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

Дополнительные условия: 1) консервативный характер ЗВ, которые подвергаются только разбавлению; 2) запорные устройства обеспечивают сброс ЗВ со скоростью течения реки и в объемах, соответствующих c_{kmax} . 3) сбросы ЗВ разных предприятий-водопользователей не должны смешиваться.

Требуется определить возможность составления расписания циклических сбросов ЗВ для N_2 предприятий-водопользователей по всем типам ЗВ массой G_{ik} ($i \in (1, N_2), k \in (1, K)$) за период T , чтобы на протяжении всей водной системы для концентрации k -го ЗВ (все вещества с одинаковым лимитирующим показателем вредности) выполнялось условие:

$$(2) c_{ik} \leq c_{kmax} \left(1 - \sum_1^{i-1} \frac{c_{ik}}{c_{kmax}} \right); i \in (1, N_2), k \in (1, K),$$

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

Если полученное при составлении расписания расчетное время цикла сброса T_e больше заданного, т.е. не выполняется условие:

$$(3) T \geq T_e,$$

то это означает, что при заданных значениях G_i расписание составить невозможно и требуется определить новые значения масс ЗВ $G_i^* \leq G_i$, которые удовлетворят условиям (2) и (3).

Иными словами требуется найти такие значения G_i^* , чтобы составить расписание, удовлетворяющее условиям (2) и (3).

Примем ряд допущений: расход сточных вод Q_{1i} для i -го предприятия много меньше расхода вод реки Q_{2i} , ($Q_{1i} \ll Q_{2i}$), коэффициент смешения $a = 1$, смешение производится мгновенно.

В единицу времени поток (расход) реки Q_{2i} может уносить g_{ik} ЗВ i -го предприятия:

$$(4) g_{ik} = c_{kmax} Q_2 = c_{kmax} \bar{S}_i \bar{v}_i$$

где c_{kmax} – ПДК для ЗВ k -го типа, \bar{S}_i – среднее сечение данного водного отрезка, \bar{v}_i – средняя скорость потока реки.

Вычислить объём \bar{V}_i^* , необходимый для растворения массы ЗВ G_i до допустимой концентрации c_{imax} :

$$(5) \bar{V}_i^* = \frac{G_i}{c_{kmax}}$$

В ориентированном графе D найти минимальный путь от i -го предприятия-водопользователя до устья реки, проходящий через M_i вершин ($M_i \subseteq (N_1 \cup N_2 \cup N_3 \cup N_4)$). Для каждого j -го отрезка этого пути ($j = 1, M$) по длине l_j и среднему сечению \bar{S}_j вычислить его объём V_j .

Найдя путь, по которому ЗВ i -го предприятия-водопользователя будут проходить по реке, по гидрографической карте определить на каком расстоянии от места сброса будет получен объём \bar{V}_i^* , необходимый для растворения G_i ЗВ.

Зная длины отрезков реки, заполняемых ЗВ i -го завода-водопользователя и среднюю скорость течения \bar{v}_i на них, вычислить времена заполнения их сбросами ЗВ предприятия: время заполнения всего объема сбросов ЗВ (t_i^*) и время заполнения сбросом ЗВ отрезка реки между $i - m$ и $i + 1 - m$ предприятием-водопользователем или устьем реки (t_i):

$$(6) t_i^* = \frac{l_i^*}{\bar{v}_i}; t_i = \frac{l_i}{\bar{v}_i};$$

В общем случае отрезок реки, заполняемый ЗВ i -го предприятия-водопользователя, может включать M_i^* участков, отличающихся своими гидрографическими характеристиками, тогда времена t_i^* и t_i вычисляем как:

$$(7) t_i^* = \sum_{j=1}^{M_i^*} \frac{l_j}{\bar{v}_j}; t_i = \sum_{j=1}^{M_i} \frac{l_j}{\bar{v}_j}$$

Цикл воздействия загрязнений на водный бассейн состоит из двух этапов:

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

Определить возможность сброса запрошенных N_2 заводами-изготовителями массы ЗВ G без нарушения экологических требований в течение заданного периода T . Для этого составляем расписание.

Составление расписания. 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 $r_i \geq 0$, задан крайний директивный срок выполнения всех работ D . В нашем случае $D = T$. 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 $T \geq T_e$, а все условия задачи соблюдены. В нашем случае $S_i = r_i$, а $p_i = t_i^*$ (то есть время, в течение которого происходит сброс ЗВ i -го завода-водопользователя).

Рассмотрим расписание сбросов ЗВ для линейного участка реки (без притоков). в варианте последовательного расписания, когда каждый сброс начинается после прохождения мимо него всех предыдущих.

Моментом окончания i -го задания служит завершение слива ЗВ с i -го завода-водопользователя через время t_i^* с его начала, но $i + 1$ -е задание начинает выполняться только после того, как масса ЗВ пройдет через отрезок реки до следующего $i + 1$ -го завода-водопользователя, то есть через время t_i после завершения предыдущего процесса.

Расписание сбросов ЗВ для линейного участка реки (без притоков) при однократном воздействии (или при инициализации системы) будет следующим:

$$(8) \left\{ \begin{array}{l} S_1(j) = 0 \\ C_1(j) = S_1(j) + t_1^* \\ \dots \\ S_i(j) = C_{i-1}(j) + t_{i-1} = S_{i-1}(j) + t_{i-1}^* + t_{i-1} \\ C_i(j) = S_i(j) + t_i^* \\ \dots \\ S_{N_2}(j) = C_{N_2-1}(j) + t_{N_2-1} = S_{N_2-1}(j) + t_{N_2-1}^* + t_{N_2-1} \\ C_{N_2}(j) = S_{N_2}(j) + t_{N_2}^* = S_1(j) + \sum_{i=1}^{N_2} t_i^* + \sum_{i=1}^{N_2} t_i \end{array} \right. , j = 1$$

Таким образом, следующий цикл сбросов может начаться по завершению транзита всех сливов с допустимой концентрацией за пределы реки, то есть через время T_e :

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

При конвейерной организации последовательного сброса, когда следующий цикл сбросов ЗВ может быть начат через $T^* < T_e$ одновременно с продолжающимся транзитом объёмов ЗВ предыдущего цикла, при соблюдении условия, при котором начало потока текущего цикла сбросов ЗВ нагонит конец потока предыдущего цикла сбросов ЗВ в месте слива последнего источника ЗВ:

$$(10) S_1(2) + \sum_{i=1}^{N_2-1} t_i = S_1(1) + \sum_{i=1}^{N_2} t_i^* + \sum_{i=1}^{N_2-1} t_i$$

Обозначим

$$(11) T^* = \sum_{i=1}^{N_2} t_i^*$$

тогда:

$$(12) S_1(2) = S_1(1) + \sum_{i=1}^{N_2} t_i^* = S_1(1) + T^*$$

$$(13) \left\{ \begin{array}{l} S_1(j) = (j-1)T^* \\ C_1(j) = S_1(j) + t_1^* \\ \dots \\ S_i(j) = C_{i-1}(j) + t_{i-1} = S_{i-1}(j) + t_{i-1}^* + t_{i-1} \\ C_i(j) = S_i(j) + t_i^* \\ \dots \\ S_{N_2}(j) = C_{N_2-1}(j) + t_{N_2-1} = S_{N_2-1}(j) + t_{N_2-1}^* + t_{N_2-1} \\ C_{N_2}(j) = S_{N_2}(j) + t_{N_2}^* \end{array} \right. , j \in (1, \infty)$$

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

Граф, описывающий топологию речного бассейна, как правило, имеет древовидную структуру. В таком графе смежные дуги (ориентированные ребра) отображают соединяющиеся водные потоки или разветвление единого русла на рукава (например, при бифуркации реки или в её дельте). Дуги такого графа нагружены характеристиками потоков (скорость потока \bar{v}_i , средняя площадь сечения участка реки \bar{S}_i , длина участка l_i).

В точке соединения дугу, характеризующуюся меньшей длиной, считаем притоком, а смежную с ней дугу – главным потоком.

Если приток имеет источники ЗВ, то сначала пропускаем ЗВ главного потока, рассчитанные по формулам (3-7), а затем присоединяем к ним ЗВ притока (рис. 1.).

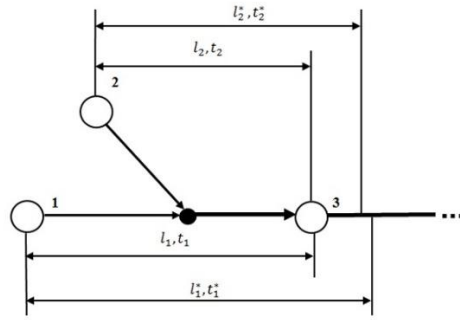


Рис. 1. Слияние двух потоков. 1, 2, 3 – источники ЗВ, t_1^*, t_2^* – время сброса, не равное времени прохождения загрязнения между 1 и 3, 2 и 3 источниками ЗВ t_1, t_2 ($t_1^* \neq t_1$; $t_2^* \neq t_2$; $t_1 > t_2$)

Для синхронизации времен завершения прохождения объема ЗВ по главному руслу и начала поступления ЗВ из притока, начало сброса ЗВ в притоке должно осуществляться с задержкой, равной разнице времён $(t_1^* + t_1)$ и t_2 (при условии $t_i^* \neq t_i$):

$$(14) \begin{cases} S_1 = 0 \\ C_1 = S_1 + t_1^* \\ S_1 + t_1^* + t_1 = S_2 + t_2 \\ S_2 = S_1 + t_1^* + t_1 - t_2 \\ C_2 = S_2 + t_2^* \end{cases}$$

где S_1, S_2 – начало выполнения запросов на сброс источников ЗВ, находящиеся соответственно на главном русле и притоке, C_1, C_2 – завершение выполнения запросов на сброс, t_1^*, t_2^* – время собственно сброса ЗВ, t_1, t_2 – время прохождения ЗВ по главному руслу и притоку (при последовательном сбросе $t_1^* \neq t_1$; $t_2^* \neq t_2$; $t_1 > t_2$).

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

$$(15) \begin{cases} S_{n_1} = S_1 + \sum_{i=1}^{n_1-1} (t_i^* + t_i) \\ S_{n_1} + (t_{n_1}^* + t_{n_1}) = S_2 + \sum_{j=1}^{n_2} t_j; i \in (1, N_2); j \in (1, N_2) \\ S_1 + \sum_{i=1}^{n_1} (t_i^* + t_i) = S_2 + \sum_{j=1}^{n_2} t_j \\ S_2 = S_1 + \sum_{i=1}^{n_1} (t_i^* + t_i) - \sum_{j=1}^{n_2} t_j = S_1 + \Delta_{12} \end{cases}$$

При разветвлении единого русла на два рукава (рис. 2) для случая бифуркации (т. е. потоки после разделения не сливаются) мы исходим из того, что:

$$(16) Q = Q_1 + Q_2,$$

где Q – расход воды до точки бифуркации; Q_1 – расход воды в основном русле; Q_2 – расход воды в другой протоке.

$$(17) Q = Sv = S_1 v_1 + S_2 v_2,$$

где S, S_1, S_2 – площади сечений реки и ее протоков; v, v_1, v_2 – скорости течения потоков. Так как эти параметры известны, то отношение объёмов будет пропорционально расходу воды:

$$(18) a = \frac{Q_1}{Q} = \frac{V_1}{V}$$

Тогда

$$(19) V_1 = aV; V_2 = (1 - a)V$$

Т. о. при бифуркации реки произойдет перераспределение объёмов ЗВ, перемещаемых по реке.

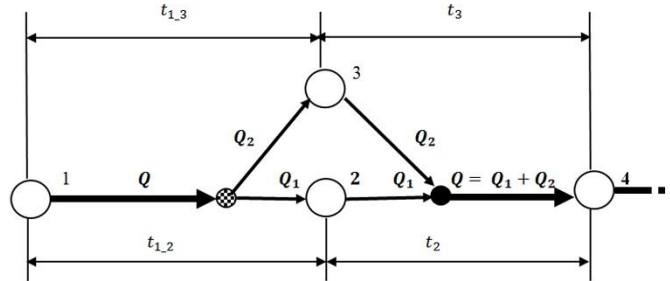


Рис. 2. Бифуркация единого потока с расходом воды Q на два потока с расходом воды $Q_1, Q_2, (Q_1 > Q_2)$ с последующим слиянием.

Рассмотрим случай слияния потоков, ранее разделенных. В этом случае возможно смещение между потоками на величину Δt из-за разницы гидрологических характеристик. (Смещение может быть минимальным лишь в случае трубопроводов, когда главная труба разветвляется на две равные по диаметру трубы, обладающие равными гидродинамическими сопротивлениями, которые потом вновь объединяется в одну трубу). При этом возможны колебания значений концентрации. Если к моменту бифуркации единый поток состоял из M ($M \leq N_2$) объёмов ЗВ, отличающихся по своему составу, то при новом объединении этих потоков на границах этих объёмов будет иметь место смещение общим объёмом V_Σ :

$$(20) V_\Sigma = (M - 1)Sv\Delta t,$$

где S – площадь сечения единого потока, v – скорость единого потока.

Поясним составление расписания для такого соединения потоков на примере. Поток с заводоупользователя 1 разделился на два рукава и затем вновь соединился, причем один из потоков сдвинут относительно другого на Δt . В главном (более коротком) рукаве находится завод 2, во втором рукаве находится завод 3. Тогда общее расписание для них будет:

$$(21) \begin{cases} S_1 = 0 \\ C_1 = S_1 + t_1^* \\ S_2 = S_1 + t_1^* + t_{1,2} + \Delta t \\ S_3 = S_2 + (t_{1,2}^* + t_{1,2}) - t_3 = S_1 + t_1^* + t_{1,2} + \Delta t + (t_{1,2}^* + t_{1,2}) - t_3 \\ C_2 = S_2 + t_2^* \end{cases}$$

Таким образом, в случае слияния потоков после бифуркации, при вычислении времен начала слива потоков ЗВ в рукавах необходимо добавлять величину максимальной разницы в задержке потоков. Используя выражения (14 – 15, 21) можно построить расписание для всех источников ЗВ речного бассейна, структура которого описана соответствующим графом. При конвейерной организации алгоритма сброса ЗВ, соответствующий период T^* будет описываться выражением (11). То есть T^* равен сумме времен сливов всех источников загрязнения, вне зависимости от того, находятся ли они на главном русле или притоках. В случае бифуркаций необходимо добавлять соответствующие значения разницы в задержке потоков при их слиянии.

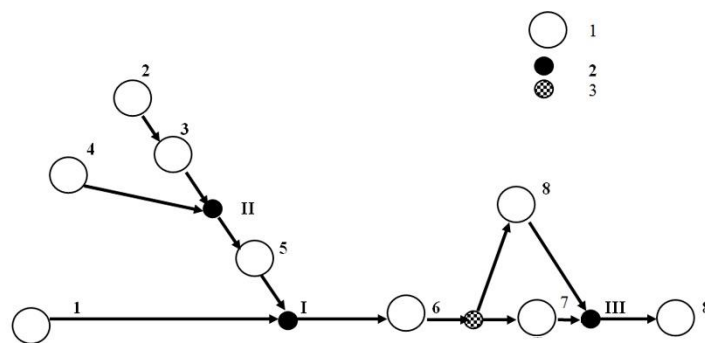


Рис. 3. Пример графа описания речного бассейна (1 – источники загрязнения, 2 – устья притоков, 3 места бифуркации единого потока).

При конвейерной организации последовательного сброса выражение (11) с учетом пар «бифуркация-слияние» приобретает вид:

$$(22) T^* = \sum_{i=1}^{N_2} t_i^* + \sum_{k=1}^{N_5} \Delta t_k ;$$

где N_5 – число пар «бифуркация – слияние»

Итоговый алгоритм:

1. Представить речной бассейн в виде ориентированного графа (дерева), узлами которого являются створы источников загрязнения, устьев притоков и мест бифуркации единого потока. 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. Если на главном потоке или на притоке имеют место бифуркации, то расположенные на них источники ЗВ последовательно маркируются от места бифуркации до устья рукава (места впадения его в водоем) или до места слияния данного потока с другим (в том числе и главным) потоком. При этом обход рукавов осуществляется в порядке возрастания задержек потоков. Одновременно определяются пары «точки бифуркации – точки слияния» для последующего вычисления сдвигов.

6. 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 сброса загрязнений, используя формулы (13-15, 21).

9. При слиянии фрагментов в единый поток после бифуркации (21) продолжительность протекания суммарного потока увеличивается на Δt , выводимой из гидрологических характеристик протоков.

10. При необходимости скорректировать расписания притоков.

11. Если условие (3) не выполнено, то для всех или наиболее загрязняющих реку предприятий следует уменьшить величины G_i пропорционально отношению $\frac{T^*}{T}$.

Пример расписания сбросов ЗВ для графа на рис. 3:

$$(22) \left\{ \begin{array}{l} S_1 = 0 \\ S_2 = S_1 + ((t_1^* + t_1 - (t_2 + t_3 + t_5)) = S_1 + \Delta_{12} \\ S_3 = S_2 + t_2 + t_2^* \\ S_4 = S_3 + (t_2^* + t_2) - t_2 = S_2 + ((t_2^* + t_2 + t_3^* + t_3) - t_4) = S_1 + \Delta_{12} + \Delta_{24} \\ \\ S_5 = S_4 + t_4^* + t_4 \\ S_6 = S_5 + t_5^* + t_5 \\ S_7 = S_6 + t_6^* + t_{6,7} + \Delta t(III) = S_1 + \Delta_{12} + \Delta_{24} + \Delta_{47} + \Delta t(III) \\ S_8 = S_7 + (t_7^* + t_7) - t_8 = S_1 + \Delta_{12} + \Delta_{24} + \Delta_{47} + \Delta_{78} + \Delta t(III) \\ S_9 = S_8 + t_8^* + t_8 \\ \\ T^* = \sum_{i=1}^9 t_i^* + \Delta t(III) \end{array} \right.$$

Алгоритмы создавались с точки зрения максимальной допустимой экологической нагрузки на бассейн реки при учете потребностей заводов-водопользователей в сбросе ЗВ. Поэтому все циклы выполнения идентичны.

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.

Литература

1. Соколов В.В., Дружинин Ю.О. Концепция виртуального полигона отработки регламентов сбросов предприятий-природопользователей в водный бассейн // Труды 12-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD-2019, Москва). М.: ИПУ РАН, 2019. /С. 1089–1093.
2. Лазарев А.А., Гафаров Е.Р. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. М.: Издательство МГУ им. М. В. Ломоносова, 2011. – 222 с.