

10. Фролов, А. М. Предварительный выбор и преднастройка балансировочных вентилей ГЕРЦ / А. М. Фролов // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2009. – № 12. <https://www.c-o-k.ru/articles/predvaritel-nyy-vybor-i-prednastroyka-balansirovochnyh-ventiley-gerc> – Дата доступа : 25.08.2021.
11. Махов, Л. М. Гидравлический режим системы водяного отопления / Л. М. Махов, С. М. Усиков // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2013. – № 1(133). – С. 72-73.
12. Настольная книга проектировщика. Издание компании HERZ Armaturen GmbH – Вена, 2008. – 192 с.
13. Покотилов, В. В. Системы водяного отопления. – Вена, 2008. – 159с.
14. СН 4.02.03-2019 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. – Минск, 2020.

УДК 621.9.08:004.514.62

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ДОЖДЕВОГО СТОКА НА УРБАНИЗИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ

*Д. О. Петров<sup>1</sup>, А. А. Волчек<sup>1</sup>, Н. В. Лапицкая<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, [rolegdo@gmail.com](mailto:rolegdo@gmail.com)

<sup>2</sup> УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, Беларусь, [lapan@bsuir.by](mailto:lapan@bsuir.by)

### **Аннотация**

Представленная работа описывает гидравлические клеточные автоматы и их совместную работу для упрощенного комплексного моделирования движения водных потоков как по цифровой модели урбанизированной территории, так и по связанной с ней модели системы ливневой канализации.

**Ключевые слова:** уравнения мелкой воды, дождевой сток, ливневая канализация, клеточный автомат.

## **SIMULATION OF RAIN RUNOFF TRANSFORMATION IN URBANIZED TERRITORY**

*D. O. Petrov, A. A. Volchak, N. V. Lapitskaya*

### **Abstract**

The presented work describes hydraulic cellular automata and their joint work for a simplified complex modeling of the movement of water flows both on a digital model of an urbanized area and on a related model of a storm sewer system.

**Keywords:** shallow water equations, rain surface runoff, storm sewer system, cellular automaton.

**Введение.** Для урбанизированных территорий становится характерным возникновение внештатных ситуаций, вызванных резким увеличением дождевого стока. Целью представленной работы является разработка упрощенной двумерной модели движения водных потоков по цифровым моделям рельефа (ЦМР)

местности в зоне городской застройки, действующей совместно с моделью системы ливневой канализации.

Теоретической основой моделирования дождевого стока является расчет динамики движения водных потоков, описываемый системой двумерных уравнений мелкой воды (Сен-Венана) [1]. При моделировании дождевого стока в зоне городской застройки применяется диффузионное приближение описания движения воды [7, 8], а для численного его решения вместо метода конечных объемов [9, 10] – двумерный клеточный автомат (КА) [2–4, 11–21].

**Материалы и методы.** Исходные данные для моделирования представлены ЦМР местности в виде матрицы высотных отметок и графом схемы соединений колодцев ливневой канализации трубами. Модель построена с учетом описанных ниже условий и ограничений. Масштаб ЦМР подбирается таким, чтобы на каждый элемент модели рельефа приходилось не более одного колодца ливневой канализации. Каждая из труб характеризуется диаметром, длиной, уклоном и величиной коэффициента гидравлического сопротивления, а для колодца известен его объем, глубина, пропускная способность дождеприемника и соответствующий элемент матрицы высотных отметок рельефа местности, на площади которого он расположен. С каждым элементом ЦМР местности, кроме высоты его расположения и площади, связана величина коэффициента гидравлического сопротивления. В состав исходных данных входит гидрограф, отражающий изменение интенсивности осадков во времени по всей площади модели рельефа местности.

Оба предлагаемых гидравлических КА выполняют итерации синхронно: длительность итерации  $\Delta T$  представляет собой переменную величину и с течением времени моделирования  $t = t + \Delta T$  подвергается перерасчету.

Технически взаимодействие КА происходит следующим образом. Клеточный автомат моделирования поверхностного стока рассчитывает поступление осадков на поверхность элементов ЦМР, вычисляет объемы воды, перемещаемой между элементами модели рельефа, определяет необходимую длительность итерации  $\Delta T$  и осуществляет распределение поверхностного стока по модели рельефа местности. Затем клеточный автомат моделирования ливневой канализации рассчитывает приток воды с поверхности элементов ЦМР в колодцы за промежуток времени  $\Delta T$  согласно пропускной способности дождеприемников. На последующих этапах решаются задачи поступления воды из наполненных колодцев в канализационные трубы, перемещения присутствующих в трубах объемов воды между колодцами и возможном истечении излишней воды из переполненных колодцев на поверхность.

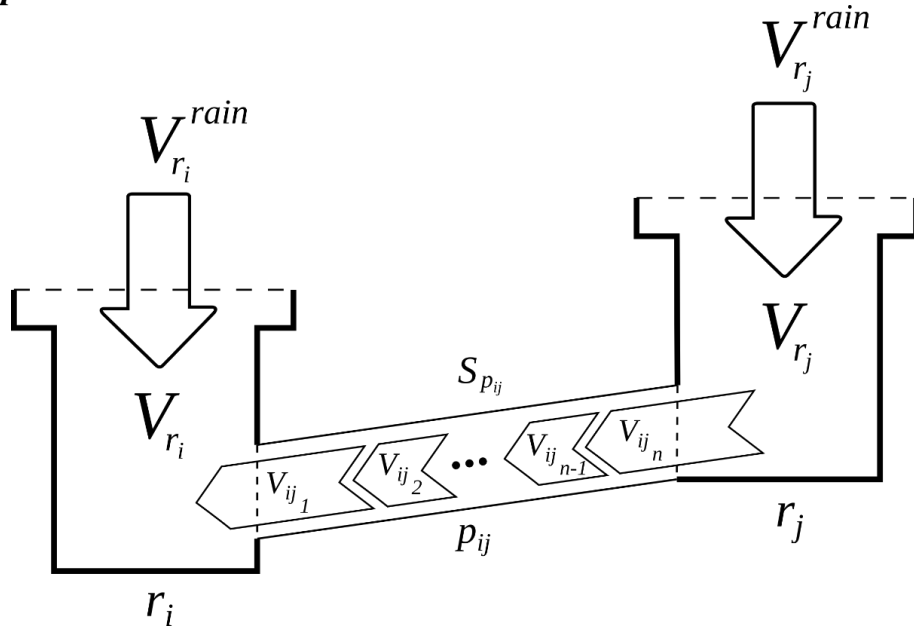
Математической основой расчета скорости движения водных масс как по земной поверхности, так и по трубам служат следующие известные эмпирические зависимости, такие как формула Маннинга для скорости водного потока в открытом русле и Хазена-Вильямса для скорости водного потока в трубопроводе:

$$v = \frac{1}{n} [R^h]^{2/3} \sqrt{S^h}, \quad (1)$$

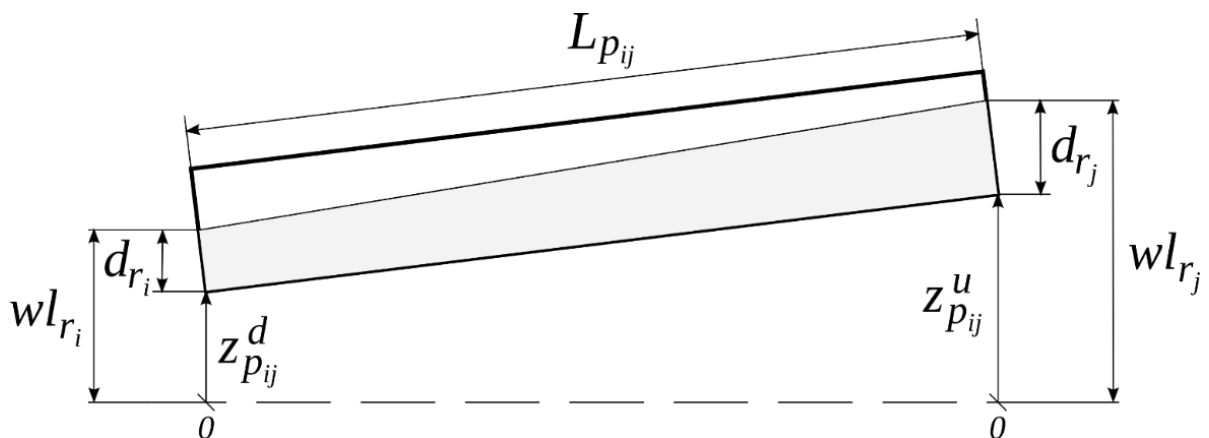
$$v = 0,849(C[R^h]^{0,63}[S^h]^{0,54}), \quad (2)$$

где  $n$  – коэффициент шероховатости по Маннингу,  $C$  – коэффициент шероховатости по Хазену-Вильямсу,  $R^h$  – гидравлический радиус,  $S^h$  – гидравлический уклон. Отдельно следует остановиться на применении формул (1) и (2) при расчете движения воды по трубам: формула (1) используется для вычисления скорости в том случае, если глубина воды в трубе менее 95% ее диаметра, в противном случае следует применять формулу (2) [5, 6].

**Структура клеточного автомата системы ливневой канализации**



**Рисунок 1** – Перемещение воды между соседними колодцами  $r_i$  и  $r_j$ , соединенными трубой  $p_{ij}$ , где  $V_{r_i}$  и  $V_{r_j}$  – объемы воды в колодцах,  $V_{r_i}^{rain}$  и  $V_{r_j}^{rain}$  – объемы воды, поступившей через дождеприемники,  $V_{ij_1} \dots V_{ij_n}$  – объемные сегменты воды, перемещающиеся по трубе  $p_{ij}$  и находящиеся в очереди  $S_{p_{ij}}$



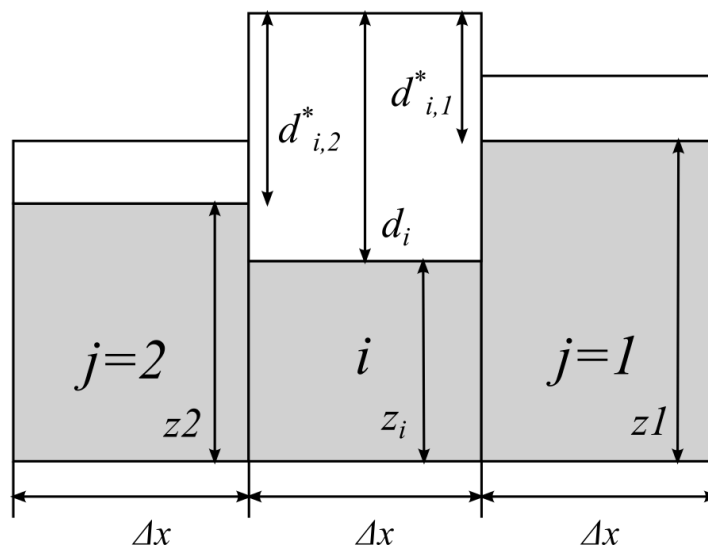
**Рисунок 2** – Схема, поясняющая расчет высоты уровня воды  $wl_{r_i}$  и  $wl_{r_j}$  в двух соседних колодцах ливневой канализации  $r_i$  и  $r_j$ , соединенных трубой  $p_{ij}$  длиной  $L_{p_{ij}}$ , где  $z_{p_{ij}}^d$  – высота нижнего края трубы со стороны колодца  $r_i$ , соответственно  $z_{p_{ij}}^u$  – высота нижнего края трубы со стороны колодца  $r_j$ . Глубина воды в колодцах  $r_i$  и  $r_j$  представлена величинами  $d_{r_i}$  и  $d_{r_j}$

На основе работ [5, 6] был создан двумерный клеточный автомат для моделирования системы уличной ливневой канализации, представляющий собой множество элементов  $r_i \in R$ . Каждый элемент  $r_i \in R$  соответствует колодцу ливневой канализации, имеющий следующие атрибуты:  $V_{r_i}^{max}$  – максимальный объем вмещаемой воды ( $m^3$ ),  $V_{r_i}$  – объем накопленной воды ( $m^3$ ),  $d_{r_i}$  – глубина накопленной воды (м),  $wl_{r_i}$  – высота уровня накопленной воды (м),  $Q_{r_i}^{rain}$  – пропускная способность установленного дождеприемника ( $m^3/c$ ), зависящая от глубины покрывающего слоя воды (см. рисунок 1).

Пары колодцев  $[r_i, r_j] \in R$  связаны между собой трубами  $p_{ij} \in P$ . Каждая труба  $p_{ij} \in P$  имеет следующие атрибуты:  $D_{p_{ij}}$  – диаметр (м),  $L_{p_{ij}}$  – длина (м),  $z_{p_{ij}}^d$  – высота нижнего края трубы со стороны колодца  $r_i$  (м),  $z_{p_{ij}}^u$  – высота нижнего края трубы со стороны колодца  $r_j$  (м),  $V_{p_{ij}}^{max}$  – максимальный объем вмещаемой воды ( $m^3$ ),  $V_{p_{ij}}$  – объем вмещаемой воды ( $m^3$ ),  $n_{p_{ij}}$  – коэффициент шероховатости по Маннингу,  $C_{p_{ij}}$  – коэффициент шероховатости по Хазену-Вильямсу (см. рисунок 2). Согласно принятой модели ливневой канализации перемещение воды в трубах  $p_{ij} \in P$  в направлении от колодца  $r_j \in R$  к колодцу  $r_i \in R$  происходит в виде последовательности сегментов воды переменного объема  $V_{ij}$  ( $m^3$ ), с каждым из которых связано время  $t_i$  (с) прибытия в колодец  $r_i \in R$  – поэтому с каждой трубой  $p_{ij} \in P$  связана очередь  $S_{p_{ij}}$  сегментов воды, организованная по принципу «первым пришел – первым вышел» (см. рисунок 3). Обозначим как  $U_{r_{ij}}$  множество колодцев  $r_j \in R$ , непосредственно связанных трубой  $p_{ij} \in P$  с колодцем  $r_i \in R$  и расположенных выше него по течению. Для моделирования отвода дождевого стока за пределы урбанизированной территории система ливневой канализации соединяется трубами с колодцами, у которых максимальный объем вмещаемой воды  $V_{r_i}^{max} = \infty$ .

### ***Структура клеточного автомата поверхностного дождевого стока***

На основе работы [4] был создан двумерный клеточный автомат для моделирования дождевого стока, представляющий собой множество элементов  $k_i \in K$ . Расположение  $k_i \in K$  совпадает с расположением имеющих форму квадрата элементов цифровой модели рельефа участка местности, на которую выпадают жидкие осадки в виде дождя, при этом предполагается, что накопившаяся вода не покидает пределов ЦМР. Обозначим множество элементов клеточного автомата, находящихся в окрестности Дж. фон Неймана относительно  $k_i \in K$  как  $k_j \in N^{k_i}$ . Подмножество элементов  $k_j \in N^{k_i}$ , которые могут получить ненулевой объем воды путем перетока от  $k_i$ , обозначим как  $k_j \in N_{V_{ij}}^{k_i}$ .



**Рисунок 3** – Величина эффективной глубины воды  $d_{ij}^*$  для элемента  $k_i$  в направлении соседей  $k_j \in N_{vij}^{ki}$ .

Для каждого элемента  $k_i$  клеточного автомата определены следующие атрибуты (см. рисунок 3):  $z_i, \Delta x, A, n_i$  – высота (м), длина стороны (м), площадь ( $\text{м}^2$ ) и коэффициент шероховатости по Маннингу соответствующего элемента ЦМР;  $d_i$  – глубина слоя воды (м);  $S_{ij} = (wl_i - wl_j)/\Delta x = \Delta wl_{ij}/\Delta x$  – гидравлический уклон между  $k_i$  и  $k_j \in N^{ki}$ , где  $wl_i = d_i + z_i$  и  $wl_j = d_j + z_j$  – высота уровня воды (м);  $wl_{ij,max}$  – максимальная высота уровня воды среди  $k_j \in N^{ki}$ ;  $d_{ij}^* = wl_i - z_j$  – эффективная глубина воды (м) для элемента  $k_i$  в направлении  $k_j \in N_{vij}^{ki}$ ;  $v_{ij} = [(d_{ij}^*)^{2/3} \sqrt{S_{ij}}]/n_i$  – скорость течения воды (м/с) между  $k_i$  и  $k_j \in N_{vij}^{ki}$ ;  $Q_{ij} = \Delta x \cdot d_{ij}^* \cdot v_{ij}$  – расход воды ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) между  $k_i$  и  $k_j \in N_{vij}^{ki}$ ;  $Q_{ij,max}$  – расход воды ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) между  $k_i$  и соседним элементом с максимальной высотой уровня воды среди  $k_j \in N_{vij}^{ki}$ ;  $\Delta t_i = [(wl_i - wl_{ij,max}) \cdot A]/(\sum Q_{ij} + Q_{ij,max})$  – промежуток времени (с), за который в процессе перетекания воды от элемента  $k_i$  ко всем соседям, для которых справедливо условие  $wl_i - wl_j \geq \delta$ , произойдет выравнивание высоты уровня воды в элементе  $k_i$  с тем соседом, у которого ранее была зафиксирована высота уровня воды, равная  $wl_{ij,max}$ ;  $V_{ij}^{out} = Q_{ij} \cdot \Delta T$  – объем воды, передаваемый от  $k_i$  в направлении  $k_j \in N_{vij}^{ki}$ , где  $\Delta T$  – шаг по времени (с), определенный для клеточного автомата на текущей итерации моделирования;  $V_i^{out} = \sum V_{ij}^{out}$  – суммарный объем воды ( $\text{м}^3$ ), покидающий элемент  $k_i$  в направлении всех  $k_j \in N_{vij}^{ki}$  на текущей итерации моделирования;  $V_i^{in} = \sum V_{ji}^{out}$  – суммарный объем воды ( $\text{м}^3$ ), поступивший от всех элементов  $k_j \in N^{ki}$  в направлении  $k_i$  на текущей итерации моделирования.

### Правило изменения состояния клеточного автомата поверхностного стока

Перед началом итераций глубина воды  $d_i$  для каждого элемента  $k_i \in K$  устанавливается равной толщине слоя воды, выпавшей с осадками за 1 секунду, и во внутреннем времени модели, общем для обоих КА проходит 1 секунда –  $t = 1$ . Правило синхронного изменения состояния элементов  $k_i \in K$  клеточного автомата на каждой итерации моделирования описывается следующей последовательностью шагов:

1. Значения  $V_{ij}^{out}$  и  $V_i^{out}$  обнуляются,  $\Delta t_i$  принимается равным  $\infty$ ,  $N_{V_{ij}}^{k_i} \equiv \emptyset$ ;
2. В случае истинности условия  $d_i < \delta$  ( $\delta = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м) выполнить переход к шагу 8;
3. Рассчитать  $S_{ij} = (wl_i - wl_j) / \Delta x = \Delta wl_{ij} / \Delta x$  для  $k_j \in N^{k_i}$ ;
4. Элементы  $k_j \in N^{k_i}$ , для которых справедливо неравенство  $S_{ij} > \delta$ , включить во множество  $N_{V_{ij}}^{k_i}$ ;
5. Вычислить  $\Delta t_i = [(wl_i - wl_{ij}^{max}) \cdot A] / (\sum Q_{ij} + Q_{ij}^{max})$ ;
6. Принять значение  $\Delta T = \min(\Delta t_i)$  – отыскание минимального  $\Delta t_i$  выполняется во всем множестве  $k_i \in K$ ;
7. Выполнить расчет  $V_{ij}^{out} = Q_{ij} \cdot \Delta T$  и  $V_i^{out} = \sum V_{ij}^{out}$ ;
8. Вычислить  $V_i^{in} = \sum V_{ji}^{out}$ ;
9. Уменьшить  $d_i$  на величину  $V_i^{out} / A$ ;
10. Прибавить к  $d_i$  сумму  $V_i^{in} / A$  и толщины слоя воды, выпавшей с осадками за промежуток времени  $\Delta T$ ;
11. Если с текущим элементом  $k_i \in K$  связан колодец ливневой канализации  $r_i \in R$ , то необходимо выполнить следующие действия::
  - 11.1. Если  $V_{r_i} > V_{r_i}^{max}$ , то следует увеличить  $d_i$  в соответствии с поступившим из колодца объемом воды  $V_{r_i}^{out} = V_{r_i} - V_{r_i}^{max}$ . При этом объем оставшейся в колодце воды станет равным  $V_{r_i}^{max}$ , а изменение состояния элемента  $k_i \in K$  на этом шаге заканчивается;
  - 11.2. Если  $V_{r_i} = V_{r_i}^{max}$ , то изменение состояния элемента  $k_i \in K$  на этом шаге заканчивается;
  - 11.3. Если  $V_{r_i} < V_{r_i}^{max}$ , то на основании пропускной способности  $Q_{r_i}^{rain}$  установленного на колодце дождеприемника, зависящей от глубины воды  $d_i$  следует рассчитать объем воды  $V_{r_i}^{rain} = Q_{r_i}^{rain} \cdot \Delta T$ ;
  - 11.4. Если  $V_{r_i}^{rain} > A \cdot d_i$ , то  $V_{r_i}^{rain} = A \cdot d_i$ ;
  - 11.5. Если  $V_{r_i}^{rain} > 0$ , то полученный объем воды необходимо добавить к объему воды  $V_{r_i}$ , уже находящемуся в колодце  $r_i \in R$ :  $V_{r_i} = V_{r_i} + V_{r_i}^{rain}$ ;
  - 11.6. Если  $V_{r_i} > V_{r_i}^{max}$ , то  $V_{r_i}^{rain} = V_{r_i} - V_{r_i}^{max}$  и  $V_{r_i} = V_{r_i}^{max}$ ;
  - 11.7. Изменить  $d_i$  в соответствии с объемом воды  $V_{r_i}^{rain}$ , перемещенным из элемента  $k_i \in K$  в колодец  $r_i \in R$ .

### **Правило изменения состояния клеточного автомата системы ливневой канализации**

Перед началом итераций объем накопленной воды  $V_{r_i}$ , глубина воды  $d_{r_i}$  и высота уровня воды  $wl_{r_i}$  для каждого колодца  $r_i \in R$  обнуляется, также очищаются очереди  $S_{p_{ij}}$  для всех труб  $p_{ij} \in P$ . Правило синхронного изменения состояния  $[r_i, r_j] \in R$ , где  $r_j \in U_{r_{ij}}$  на каждой итерации моделирования описывается следующей последовательностью шагов:

1. При наличии в очереди  $S_{p_{ij}}$  сегментов воды  $V_{ij}$  с временем прибытия  $t_i < t$  необходимо рассчитать их суммарный объем  $V_{r_i}^{in}$ , удалить их из очереди, уменьшить объем накопленной воды  $V_{p_{ij}}$  в трубе  $p_{ij}$  на величину  $V_{r_i}^{in}$  и соответственно увеличить объем накопленной воды  $V_{r_i}$  в колодце  $r_i$  на величину  $V_{r_i}^{in}$ ;
2. Рассчитать высоты уровней воды  $wl_{r_i} = z_{p_{ij}}^d + d_{r_i}$ ,  $wl_{r_j} = z_{p_{ij}}^u + d_{r_j}$ ;
3. Если  $d_{r_j} > 0$ , то необходимо выполнить следующие действия:
  - 3.1. Вычислить гидравлический уклон  $S_{ij}^h = (wl_{r_j} - wl_{r_i})/L_{p_{ij}}$  и гидравлический радиус  $R_{r_j}^h$ ;
  - 3.2. Определить скорость перетекания воды  $v_{ij}$  (м/с) между колодцами  $r_i$  и  $r_j$  используя формулу (1), если  $d_{r_j}$  меньше 95%  $D_{p_{ij}}$  – в противном случае применяется формула (2);
  - 3.3. Вычислить расход воды  $Q_{ij} = v_{ij} \cdot A_{r_j}$  (м<sup>3</sup>/с), где  $A_{r_j}$  – площадь сечения водного потока со стороны колодца  $r_j$ ;
  - 3.4. Рассчитать объем сегмента воды  $V_{ij} = Q_{ij} \cdot \Delta T$ , поступающего из колодца  $r_j$  в трубу  $p_{ij}$ ;
  - 3.5. Если  $V_{p_{ij}} + V_{ij} > V_{p_{ij}}^{max}$ , то следует уменьшить объем сегмента:  $V_{ij} = V_{p_{ij}}^{max} - V_{p_{ij}}$ ;
  - 3.6. Уменьшить объем накопленной воды  $V_{r_j}$  на величину объема  $V_{ij}$  исходящего из колодца сегмента;
  - 3.7. Добавить объем  $V_{ij}$  поступающего сегмента к общему объему воды  $V_{p_{ij}}$  в трубе  $p_{ij}$ ;
  - 3.8. Поместить сегмент  $V_{ij}$  в очередь  $S_{p_{ij}}$  и рассчитать время  $t_i = L_{p_{ij}}/v_{ij}$  его прибытия в колодец  $r_i$ .

**Заключение.** В представленной работе предложены клеточные автоматы, предназначенные для моделирования движения водных потоков как по цифровым моделям рельефа (ЦМР) местности в зоне городской застройки, так и в системе ливневой канализации. Предложен способ их сопряжения для решения задачи комплексного моделирования трансформации дождевого стока на урбанизированной территории. На текущий момент анализ адекватности результатов работы комплекса клеточных автоматов на проводился.

### Список цитированных источников

1. Кивва, С. Л. Двумерное моделирование дождевого стока и транспорта наносов на малых водосборах / С. Л. Кивва, М. И. Железняк // Прикладна гідромеханіка. – 2002. – Т. 4 (76), № 1. – С. 34–43.
2. Costabile P. Comparative analysis of overland flow models using finite volume schemes / P. Costabile, C. Costanzo, F. Macchione // Journal of Hydroinformatics. – 2012. – Vol. 14, № 1. – P. 122–135.
3. Dottori F. A 2d flood inundation model based on cellular automata approach / F. Dottori, E. Todini // XVIII International Conference on Water Resources, Barcelona, Spain, June 21-24, 2010 / International Centre for Numerical Methods in Engineering. – International Centre for Numerical Methods in Engineering, 2010.
4. Development of a diffusive wave shallow water model with a novel stability condition and other new features / M. Jahanbazi, I. Özgen, R. Aleixo, R. Hinkelmann // Journal of Hydroinformatics. – 2017. – Vol. 19, № 3. – P. 405–425.
5. Quick and Accurate Cellular Automata Sewer Simulator / R. J. Austin, A. S. Chen, D. A. Savić, S. Djordjević // Journal of Hydroinformatics. – 2014. – Vol. 16, № 6. – P. 1359–1374.
6. Fast Simulation of Sewer Flow using Cellular Automata / R. J. Austin, A. S. Chen, D. A. Savić, S. Djordjević // 8<sup>th</sup> International Conference on planning and technologies for sustainable management of Water in the City, Lyon, France, Jun. 2013. – Lyon, 2013.
7. Néelz S. Desktop review of 2D hydraulic modelling packages / S. Néelz, G. Pender. – Bris-tol : Environment Agency. – 2009. – 63 p.
8. A highly efficient 2D flood modelling with sub-element topography / S. R. Jameison, J. Lhomme, G. Wright, B. Gouldby // Proceedings of the ICE - Water Management. – 2012. – Vol. 165, № 10. – P. 581–595.
9. Смирнов, Е. М. Метод конечных объемов в приложении к задачам гидродинамики и теплообмена в областях сложной геометрии / Е. М. Смирнов, Д. К. Зайцев // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 2004. – Т. 2, № 36. – С. 70–81.
10. Баранов, А. В. Гидрологический модуль в программном комплексе «Нимфа» / А. В. Баранов, О. И. Бутнев, М. Л. Сидоров, В. А. Пронин // Супервычисления и математическое моделирование. Труды XVII Международной конференции / Под ред. Р. М. Шагалиева, Саров, 15-19 октября 2018 г. / ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». – Саров : ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2019. – С. 33–37.
11. Тоффоли, Т. Машины клеточных автоматов: пер. с англ. / Т. Тоффоли, М. Марголюс. – М. : Мир, 1991. – 280 с.
12. Cellular automata for simulating lava flows: A method and examples of the Etnean eruptions / D. Barca, G.M. Crisci, S. Di Gregorio, F. Nicoletta // Transport Theory and Statistical Physics. – 1994. – Vol. 23, № 1-3. – P. 195–232.
13. Di Gregorio S., Serra R. An empirical method for modelling and simulating some complex macroscopic phenomena by cellular automata // Future Generation Computer Systems. – 1999. – № 16. – P. 259–271.



14. Pyroclastic flows modelling using cellular automata / M. V. Avolio, G. M. Crisci, S. Di Gregorio, R. Rongo, W. Spataro, D. D'Ambrosio // *Computers & Geosciences*. – 2006. – № 32. – P. 897–911.
15. Developing an effective 2-D urban flood inundation model for city emergency management based on cellular automata / L. Liu, Y. Liu, X. Wang, D. Yu, K. Liu, H. Huang, G. Hu // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* – 2015. – № 15. – P. 381–391.
16. A Cellular Automata Fast Flood Evaluation (CA- ffé) Model / B. Jamali, P.M. Bach, L. Cunningham, A. Deletic // *Water Resources Research*. – 2019. – № 55. – P. 4936–4953.
17. Cirbus J. Cellular Automata for the Flow Simulations on the Earth Surface, Optimization Computation Process / J. Cirbus, M. Podhoranyi // *Appl. Math. Inf. Sci.* – 2013. – Vol. 7, № 16. – P. 2149–2158.
18. Application of cellular automata approach for fast flood simulation / B. Ghimire, A.S. Chen, S. Djordjević, D. A. Savić // *CCWI 2011: Computing and Control for the Water Industry*, Exeter, UK, September 5-7, 2011 / University of Exeter. – University of Exeter, 2011.
19. A weighted cellular automata 2D inundation model for rapid flood analysis / M. Guidolin, A. S. Chen, B. Ghimire, E. C. Keedwell, S. Djordjević, D. A. Savić // *Environmental Modelling & Software*. – 2016. – № 84. – P. 378 - 394.
20. A highly efficient 2D flood modelling with sub-element topography / S. R. Jameison, J. Lhomme, G. Wright, B. Gouldby // *Proceedings of the ICE - Water Management*. – 2012. – Vol. 165, № 10. – P. 581–595.
21. Система расчета и визуализация зоны затопления на основе клеточного автомата / Д. О. Петров, А. А. Волчек, Д. А. Костюк, Н. Н. Шешко // *Актуальные проблемы наук о Земле: использование природных ресурсов и сохранение окружающей среды: сб. материалов междунар. науч.-практ. конф., посвящ. году науки в Респ. Беларусь : в 2 ч., Брест, 25 – 27 сент. 2017 г.* / Ин-т природопользования НАН Беларуси, Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина, Брест. гос. техн. ун-т ; редкол. : А. К. Карабанов [и др.] ; науч. ред. А. К. Карабанов, М. А. Богдасаров. – Брест: БрГУ, 2017. – Ч. 1. – С. 145–148.

УДК 626.81

## **ОЦЕНКА ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ НИЗОВИЙ СЫРДАРЬИ**

*Е. Саркынов<sup>1</sup>, О. Мешик<sup>2</sup>, Ж. Жакупова<sup>1</sup>, А. Койчыкулова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Казахский национальный аграрный исследовательский университет, Алматы, Казахстан, sarkynov\_e@mail.ru

<sup>2</sup> УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, omeshik@mail.ru

### **Аннотация**

Статья выполнена на основе статистического и корреляционного анализов, собранных гидрологических данных по стоку по гидрометрическому посту г.