

## 05.23.07 ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

# Простые волны в теории двухмерных в плане водных потоков и схема их использования для свободного растекания потока

УДК 532.5 : 004.942

**Александрова М.С.**

Аспирант кафедры «Общеинженерные дисциплины», ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (г. Новочеркасск); e-mail: e\_masha@mail.ru

Статья получена: 07.07.2020. Рассмотрена: 10.07.2020. Одобрена: 11.08.2020. Опубликовано онлайн: 30.09.2020. ©РИОР

**Аннотация.** Выведены основные понятия и уравнения движения нестационарного радиального потока, поставлены задачи направления получения аналитических решений. Обозначены результаты экспериментальных исследований и их параметры, которые будут использованы для верификации полученных решений.

**Ключевые слова:** экспериментальные исследования, определение двухмерного радиального источника, свободное растекание потока, уравнения движения.

**Цель работы:** дать определение, описать свойства простых волн и охарактеризовать их роль в синтезе течения сложных потоков из набора элементарных на примере свободного растекания бурного потока.

Работа актуальна ввиду того, что простая волна является связующим звеном между течением равномерного потока и течением общего вида [1], а в теме диссертационной работы соискателем рассматривается течение — свободное растекание бурного потока.

### Определение простой волны

Частные течения, у которых линии равных значений модуля скорости ( $u = \text{const}$ ) и линии одного направления скорости ( $\theta = \text{const}$ ) совпадают, называются простыми волнами (из рассмотрения исключается случай, когда во всей области течение равномерное). Свойства линий  $L$ , вдоль которой  $u = \text{const}$  ( $\theta = \text{const}$ ). В плане течения потока — это прямые линии.

В плоскости годографа скорости эта линия обозначается одной точкой.

### Основное свойство линий $L$

В [1] доказывается, что линии  $L$  являются характеристиками (линиями возмущения).

### Эквивалентное определение простой волны

Простая волна — это течение, у которого одно из семейств характеристик — прямые линии.

### Основное свойство синтеза течений, включающих равномерный поток и неравномерное течение общего вида

Простые волны служат переходной формой от равномерного потока к неравномерному.

## SIMPLE WAVES IN THE THEORY OF TWO-DIMENSIONAL WATER FLOWS AND THE SCHEME OF THEIR USE FOR FREE FLOW SPREADING

**Aleksandrova M.S.**

Postgraduate Student, Department of General Engineering Disciplines, Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk; e-mail: e\_masha@mail.ru

Manuscript received: 07.07.2020. Revised: 10.07.2020. Accepted: 11.08.2020. Published online: 30.09.2020. ©RIOR

**Abstract.** The basic concepts and equations of motion of a non-stationary radial flow are derived, and the tasks of obtaining analytical solutions are set. The results of experimental studies and their parameters that will be used for verification of the obtained solutions are indicated.

**Keywords:** experimental studies, determination of a two-dimensional radial source, free flow spreading, equations of motion.

К равномерному течению непосредственно может примыкать только простая волна, а не течение общего вида.

Синтез сложных течений заключается во взаимной увязке наиболее простых потоков в единое целое.

Элементами, из которых формируется сложный поток, являются:

- равномерный поток;
- радиальное течение;
- круговой поток;
- простая волна как переходный участок между равномерным потоком и течением общего вида.

Если очертить стенки водовода по линиям тока таких комбинированных потоков, то можно получить наиболее рациональные формы канала, отвечающие его цели, назначению.

Так как понятие простой волны тесно связано с понятием характеристик, то приведем основные известные зависимости [2–7] для характеристик.

В плоскости годографа скорости уравнение двух семейств характеристик имеет вид:

$$\theta = \pm \left[ \sqrt{3} \cdot \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{3\tau - 1}{3(1 - \tau)}} - \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{3\tau - 1}{1 - \tau}} \right) \right] + C_{1,2}, \quad (1)$$

где знаки  $\pm$  отвечают двум семействам характеристик;

$\theta$  — угол, характеризующий направление вектора скорости;

$$\tau = \frac{V^2}{2gH_0} \text{ — параметр в плоскости годографа скорости;}$$

фа скорости;

$V$  — модуль местной скорости;

$g$  — ускорение силы тяжести;

$H_0$  — постоянная в интеграле Д. Бернулли.

$C_1, C_2$  — постоянные, определяемые по параметрам  $\theta^*$ ,  $\tau^*$  в некоторой известной рассматриваемой точке потока.

В форме (1) уравнение для характеристик предложил В.Н. Коханенко в работах [2; 3; 8].

В переменных  $F, \theta$  в плоскости годографа скорости уравнения характеристик имеют вид [1]:

$$\varepsilon = \mp \left( \sqrt{3} \cdot \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{F - 1}{3}} - \operatorname{arctg} \sqrt{F - 1} \right) + C'. \quad (2)$$

Несколько более компактный вид этого уравнения можно получить, если вместо числа Фруда  $F$  ввести волновой угол  $\alpha$

$$\varepsilon = \mp \left[ \sqrt{3} \cdot \operatorname{arctg} (\sqrt{3} \operatorname{tg} \alpha) - \alpha \right] + C_1. \quad (3)$$

В такой форме уравнения характеристик дает в своей работе Н.Т. Мелешенко [9].

Вместо  $F$  иногда в расчетах используют безразмерную скорость  $V = u/u_k = u/\sqrt{gh_k}$ . Нетрудно установить соотношение

$$F = \frac{2V^2}{3 - V^2}.$$

Подставляя это в (2) и преобразуя, получим:

$$\varepsilon = \mp \left( \sqrt{3} \cdot \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{V^2 - 1}{3 - V^2}} - \operatorname{arctg} \sqrt{3 \frac{V^2 - 1}{3 - V^2}} \right) + C'. \quad (4)$$

Некоторые исследователи [9] пользуются в качестве безразмерной скорости величиной  $V_* = u/u_m$ . Очевидно,  $V = \sqrt{3}V_*$ . В этой переменной уравнение (4) примет вид:

$$\varepsilon = \left[ \sqrt{3} \cdot \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{3V_*^2 - 1}{3(1 - V_*^2)}} - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{3V_*^2 - 1}{1 - V_*^2}} \right] + C'. \quad (5)$$

Несколько иные модификации дают в своих работах Г.И. Сухомел [10] и И.А. Шеренков [11].

Уравнения (1)–(5) выражают в конечной форме связь между параметрами потока на характеристиках и графически могут быть изображены двумя семействами кривых, каждое из которых зависит от одного параметра  $C'$  ( $C''$ ). Очевидно, эти два семейства характеристик образуют универсальную, общую для всех бурных потоков сетку, называемую обычно диаграммой характеристик. Нетрудно заключить, что характеристики одного и того же семейства не могут пересекаться ни в одной точке, где  $u \neq 0$ .

Полученные выше различные формы уравнений характеристик представляют собой удоб-

ный и эффективный аппарат для расчетов двухмерных бурных потоков [1].

Диаграмма эпициклоид приведена на рис. 1 [9]. Каждая из кривых этой диаграммы характеризуется фиксированным значением постоянной  $C'$  в уравнении (5). Выраженные в градусах значения постоянной  $C'$ , имеющей смысл угла  $\epsilon$  при  $V_* = 1/\sqrt{3} = 0,577$ , нанесены на внутренней окружности диаграммы. Можно видеть, что каждая пара характеристик одного семейства соответствует значениям постоянной  $C'$ , отличающейся на  $\pm 4^\circ$ . Всякий радиус-вектор, проведенный из начала координат в какую-либо точку характеристики (эпициклоиды), имеет проекции.

$$\left. \begin{aligned} V_{*x} &= V_* \cos \epsilon = \frac{u}{u_m} \cos \epsilon = \frac{u_x}{u_m} \\ V_{*y} &= V_* \sin \epsilon = \frac{u}{u_m} \sin \epsilon = \frac{u_y}{u_m} \end{aligned} \right\}$$

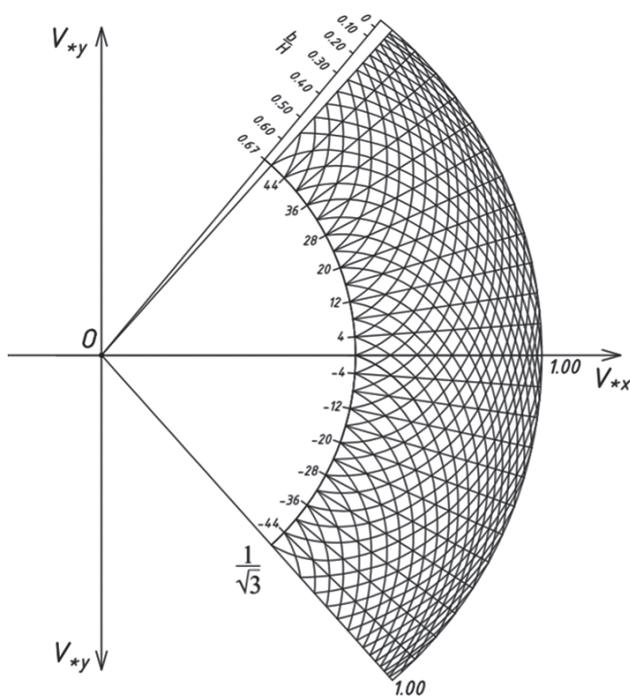


Рис. 1. Диаграмма характеристик (эпициклоид) в плоскости годографа скорости

В физической области течения потока известны угловые коэффициенты характеристик:

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg}(\theta \pm \alpha), \quad (6)$$

где  $\alpha = \arcsin \frac{1}{\sqrt{F}}$ ;  $F = \frac{2\tau}{1-\tau}$ .

Вывод — линии возмущения образуют с направлением вектора скорости, т.е. с линиями тока, углы  $\pm\alpha$ .

Свойства геометрии между характеристиками в физической  $\phi(OXY)$  области течения потока и плоскости годографа скорости  $\Gamma(\tau, \theta)$  широко изучены и описаны в литературе [1; 8].

Далее приведем пример (схему) сопряжения элементов потока при его свободном растекании (рис. 2).

- I — равномерный поток;
- II — простая волна;
- $A_1M_1, A_2M_2$  — прямолинейные характеристики (второго семейства);
- III — течение общего вида (радиальное растекание потока);
- $M_1A_n$  — характеристика первого семейства.

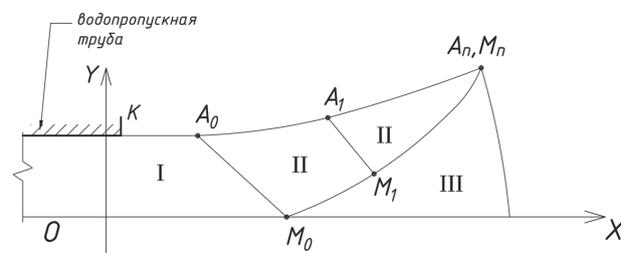


Рис. 2. Схема сопряжения потоков I, II, III при свободном растекании всего потока (результатирующего)

### Выводы

В работе предложена и обоснована схема сопряжения равномерного потока и радиального с использованием понятия «простая волна». В связи с этим рассмотрены и систематизированы основные понятия и аналитические зависимости для простых волн.

## Литература

1. *Емцев Б.Т.* Двухмерные бурные потоки [Текст] / Б.Т. Емцев. — М.: Энергия, 1967. — 212 с.
2. *Коханенко В.Н.* Моделирование одномерных и двухмерных открытых водных потоков [Текст]: монография. — Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2007. — 168 с.
3. *Коханенко В.Н.* Моделирование бурных двухмерных в плане водных потоков [Текст]: монография / В.Н. Коханенко, Я.В. Волосухин, М.А. Лемешко, Н.Г. Папченко; под общ. ред. В.Н. Коханенко. — Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2013. — 180 с.
4. *Александрова М.С.* Метод аналогий между гидравликой двухмерных в плане водных потоков и газовой динамикой [Текст] / М.С. Александрова // Строительство и архитектура. — 2020. — Т. 8. — Вып. 2. — С. 49–52. — DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-2-49-52.
5. *Коханенко В.Н.* Двухмерный в плане вихреисточник [Текст] / В.Н. Коханенко, О.А. Бурцева, М.С. Александрова // Строительство и архитектура. — 2020. — Т. 8. — Вып. 2. — С. 44–48. — DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-2-44-48.
6. *Коханенко В.Н.* Алгоритм сопряжения двухмерных в плане равномерного и радиального потоков [Текст] / В.Н. Коханенко, М.С. Александрова // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2020. — № 3. — С. 18–21. DOI: 10.17213/1560-3644-2020-3-18-21.
7. *Александрова М.С.* Схема использования простых волн при свободном растекании потока [Текст] / М.С. Александрова // Студенческая научная весна — 2020: матер. региональной науч.-техн. конф. студ., аспирантов и молодых ученых вузов Ростовской области, г. Новочеркасск, 13–14 мая 2020 г., Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. — Новочеркасск: Изд-во ЮРГПУ (НПИ), 2020. — С. 7.
8. *Высоцкий Л.И.* Управление бурными потоками [Текст] / Л.И. Высоцкий. — М.: Энергия, 1977. — 280 с.
9. *Мелешенко Н.Т.* Плановая задача гидравлики открытых потоков [Текст] / Н.Т. Мелешенко // Известия ВНИИГ. — 1948. — Т. 36.
10. *Ippel A.T.* Mechanics of supercritical flow // Transaction ASCE. 1951. Vol. 116.
11. *Сухомел Г.И.* Вопросы гидравлики открытых русел и сооружений. — Киев: АН УССР, 1949.
12. *Шеренков И.А.* О плановой задаче растекания струи бурного потока несжимаемой жидкости [Текст] / И.А. Шеренков // Известия АН СССР. Отделение технических наук. — 1958. — № 1.

## References

1. Emcev B.T. *Dvuhmernye burnye potoki* [Two-dimensional stormy streams]. Moscow: Energiya Publ., 1967. 212 p.
2. Kohanenko V.N. *Modelirovanie odnomernyh i dvuhmernyh otkrytyh vodnyh potokov* [Modeling of one-dimensional and two-dimensional open water flows]. Rostov-on-Don: YuFU Publ., 2007. 168 p.
3. Kohanenko V.N. *Modelirovanie burnyh dvuhmernyh v plane vodnyh potokov* [Modeling of stormy two-dimensional in terms of water flows]. Rostov-on-Don: YuFU Publ., 2013. 180 p.
4. Aleksandrova M.S. Metod analogij mezhdru gidravlikoj dvuhmernyh v plane vodnyh potokov i gazovoj dinamikoj [The method of analogies between the hydraulics of two-dimensional in terms of water flows and gas dynamics]. *Stroitel'stvo i arhitektura* [Building and architecture]. 2020, V. 8, I. 2, pp. 49–52. DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-2-49-52.
5. Kohanenko V.N., Burceva O.A., Aleksandrova M.S. Dvuhmernyj v plane vikhreistochnik [Two-dimensional vortex source in plan]. *Stroitel'stvo i arhitektura* [Building and architecture]. 2020, V. 8, I. 2, pp. 44–48. DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-2-44-48.
6. Kohanenko V.N., Aleksandrova M.S. Algoritm sopryazheniya dvuhmernyh v plane ravnomernogo i radial'nogo potokov [Algorithm for conjugation of two-dimensional in terms of uniform and radial flows]. *Izvestiya VUZov Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya VUZov Severo-Kavkazskiy region. Technical sciences]. 2020, I. 3, pp. 18–21. DOI: 10.17213/1560-3644-2020-3-18-21.
7. Aleksandrova M.S. Skhema ispol'zovaniya prostyh voln pri svobodnom rastekanii potoka [Scheme of using simple waves with free flowing flow]. *Studencheskaya nauchnaya vesna — 2020: mater. Regional'noj nauch.-tekhn. konf. stud., aspirantov i molodyh uchenyh vuzov Rostovskoj oblasti, g. Novocherkassk, 13–14 maya 2020 g., Yuzhno-Rossijskij gosudarstvennyj politekhnicheskij univeritet (NPI) imeni M.I. Platova* [Student scientific spring — 2020: mater. Regional scientific and technical conf. students, graduate students and young scientists of universities of the Rostov region, Novoherkassk, May 13–14, 2020, South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platova]. Novoherkassk: YuRGPU (NPI) Publ., 2020, p. 7.
8. Vysockij L.I. *Upravlenie burnymi potokami* [Management of stormy flows]. Moscow: Energiya Publ., 1977. 280 p.
9. Meleshchenko N.T. Planovaya zadacha gidravliki otkrytyh potokov [Planned problem of open flow hydraulics]. *Izvestiya VNIIG* [Izvestia VNIIG]. V. 36, 1948.
10. Ippel A.T. Mechanics of supercritical flow // Transaction ASCE, 1951, vol. 116.
11. Suhomel G.I. Voprosy gidravliki otkrytyh rusel i sooruzhenij [Questions of hydraulics of open channels and structures]. AN USSR Publ., Kiev, 1949.
12. Sherenkov I.A. O planovoj zadache rastekaniya strui burnogo potoka neszhimaemoj zhidkosti [On the planned problem of spreading a jet of a stormy flow of an incompressible fluid]. *Izvestiya AN SSSR. Otdelenie tekhnicheskikh nauk* [Izvestiya of the USSR Academy of Sciences, Department of Technical Sciences]. I. 1, 1958.