

Г.А. Евсеев<sup>1</sup>, А.Г. Евсеев<sup>1</sup>, А.А. Капичников<sup>2</sup>, В.А. Ткач<sup>3</sup>

Институт высоких температур РАН, Москва, Россия (1)

МП «Теплоцентральный», г. Жуковский, Россия (2)

ЗАО «Авиакомплекс», г. Жуковский, Россия (3)

## КОНТУР БЕЗОТРЫВНОГО ПОВОРОТА ПОТОКА НА 180° В КАНАЛАХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ «ЖИДКОСТЬ–ЖИДКОСТЬ»

### АННОТАЦИЯ

В работе рассматривается принцип работы, реальная конструкция и условия эксплуатации теплообменника «жидкость–жидкость», удовлетворяющего требованию отсутствия или минимизации осадкоотложения на его внутренних поверхностях. Предложен расчет переменного контура внутренней стенки канала теплообменника, обеспечивающего безотрывный поворот на 180°. Проведены расчеты и эксперименты с теплообменником «жидкость–жидкость», в которых были реализованы высокие (более 1 м/с) скорости течения нагреваемой и нагревающей воды. Экспериментально доказано, что при таких скоростях после 25 суток испытания мощность теплообменника не менялась в течение 50 последующих суток, а при визуальном осмотре на повороте канала теплообменника не было обнаружено отложений солей жесткости, т.е. отсутствуют отрывные зоны.

Теплообменники «жидкость–жидкость» используются в системах теплоснабжения зданий – для отопления и горячего водоснабжения. Плоские теплообменники «жидкость–жидкость» выполняются в виде пакета пластин с каналами для нагревающей и нагреваемой воды и крайними силовыми пластинами. В пластинах выполняются либо каналы прямоугольной формы (см., например, [1, 2]) или поверхность пластин выполняется гофрированной (см., например, [3, 4]).

На рис. 1 представлены схематично основные элементы плоского теплообменника – промежуточные пластины 1, в которых выполнены каналы в форме «змейки» 2, разделительные пластины 3, коллекторы подвода нагревающей или нагреваемой воды 4, уплотняющее покрытие промежуточных пластин 5. Промежуточные и разделительные пластины собираются в пакет и поджимаются крайними пластинами (на рисунке не показаны). Нагреваемая и нагревающая воды подаются в каналы через соответствующие коллекторы и отводятся из них также через соответствующие коллекторы.

Одним из главных требований, предъявляемых к теплообменнику, является минимизация осадкоотложения на внутренних поверхностях теплообменника в процессе эксплуатации. При радиусном повороте канала на выходе из него скачком изменяется радиус кривизны на внутренней стенке канала и, как следствие, резкое возрастание давления на внутренней стенке канала. При малом отношении радиуса кривизны к диаметру трубы наблюдается отрывная зона на внутренней стенке канала, что приводит к возрастанию местного сопротивления поворота (см., например, [5, 6]). Наличие отрывной зоны будет способствовать и осадкоотложению в ней. Для уменьшения осадкоотложения на внутрен-

ней стенке канала за радиусными поворотами «змейки» предложено [2] такое выполнение профиля поворота с изменением радиуса кривизны поворота, которое исключало бы отрывную зону на внутренней стенке канала за поворотом [7].

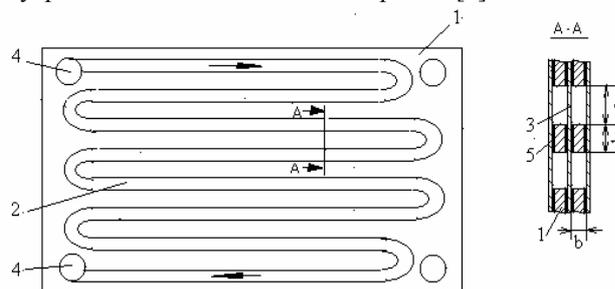


Рис. 1. Схематичное представление основного элемента теплообменника:

1 – промежуточная пластина; 2 – канал; 3 – разделительная пластина; 4 – коллекторы; 5 – уплотнения

Остановимся на проблеме расчета такого поворота. Ключевым моментом при выборе формы канала при повороте является отсутствие отрыва турбулентного пограничного слоя при повышении давления за поворотом. Для этого воспользуемся критерием отрыва турбулентного пограничного слоя, предложенным Бам-Зеликовичем (см., например, [8]). Согласно этому критерию отрыв турбулентного пограничного слоя не наблюдается, если

$$\zeta = \frac{\delta^*}{\rho U^2} \frac{dp}{d\xi} \leq 0,15, \quad (1)$$

где  $p$  – давление,  $\xi$  – продольная координата, отсчитываемая вдоль поверхности внутренней стенки (см. рис. 2);  $\delta^*$  – толщина вытеснения турбулентного пограничного слоя, выражающая смещение действительной линии тока по отношению к идеальной (см., например, [8]);  $\rho$  – плотность жидкости;  $U$  – скорость жидкости.

На рис. 2 представлены контур внутренней стенки канала и системы координат: декартовых  $x$  и  $y$  с координатами  $(0,0)$  в центре радиуса поворота  $R_0$ , координаты  $\xi$  и  $\eta$ , связанные с внутренней стенкой канала,  $R$  – локальный радиус кривизны,  $U$  – скорость воды в канале,  $x_{\text{кон}}$  – координата конечной точки поворота. При угле  $\varphi \leq \varphi_0$  радиус поворота постоянен и равен  $R_0$ .

Определим такое изменение радиуса кривизны внутренней стенки, которое удовлетворяет критерию (1). В этом случае нам удастся избежать отрыва в канале на его внутренней стенке за поворотом потока.

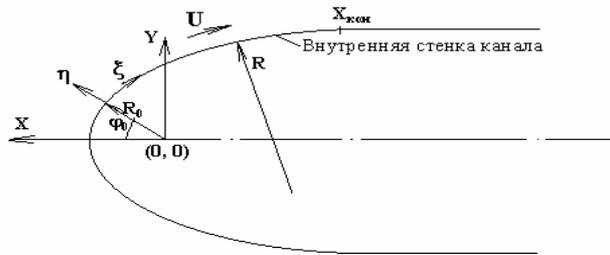


Рис. 2. Контур внутренней стенки канала и система координат

**Расчет формы канала при повороте.** Изменение давления по радиусу канала при повороте

$$\frac{\partial p}{\partial \eta} = \frac{\rho U^2}{R + \eta}, \quad (2)$$

где  $R = R(\xi)$  – радиус внутренней стенки канала;  $\eta$  – поперечная координата, отсчитываемая по нормали к поверхности внутренней стенки (см. рис. 2). В предположении  $U = \text{const}$  проинтегрировав (2) по  $\eta$ , получим изменение давления  $\Delta p$  между линией тока с  $\eta = ma$  ( $0 \leq m \leq 1$ ) и внутренней стенкой канала ( $\eta = 0$ ):

$$\Delta p = \rho U^2 \ln \left( 1 + \frac{ma}{R} \right), \quad (3)$$

где  $a$  – ширина канала;  $m$  – параметр, определяющий линию тока ( $m = 0,5$  – осевая линия тока).

Примем, что давление на осевой линии тока канала ( $m = 0,5$ ) такое же, как в плоской части канала, при этом на внутренней стенке канала будет наблюдаться разрежение. В начале поворота с уменьшением радиуса кривизны стенки давление падает на входе в поворот, а затем с увеличением радиуса кривизны стенки растет при выходе из поворота. Продифференцировав (3) по  $\xi$  в предположении  $U = \text{const}$ , можно записать, что в продольном направлении изменение давления на внутренней стенке канала на его выходе будет равно

$$\frac{dp}{d\xi} = -\frac{d\Delta p}{d\xi} = \rho U^2 \frac{ma}{R(R+ma)} \frac{dR}{d\xi}. \quad (4)$$

Тогда с учетом (4) можно записать для критерия отрыва пограничного слоя (1)

$$\zeta = \frac{\delta^* ma}{R(R+ma)} \frac{dR}{d\xi} \leq 0,15. \quad (5)$$

Остановимся теперь на определении толщины вытеснения  $\delta^*$  турбулентного пограничного слоя. В работе [9] приведены данные расчета и эксперимента по изменению профиля скорости в круглой трубе на разных калибрах по ее длине. В случае полностью развитого пограничного слоя (сомкнутого слоя) отношение максимальной скорости к средней скорости согласно [9] равно  $U_{\max}/U_0 = 1,21$ . Тогда из условия  $(D/2 - \delta^*)^2 U_{\max} = (D/2)^2 U_0$  легко определить относительную величину толщины вытеснения:

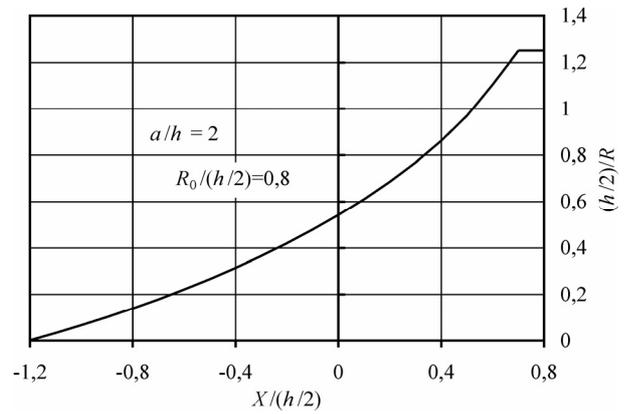


Рис. 3. Изменение относительной кривизны  $(h/2)/R$  контура внутренней стенки канала в зависимости от относительной продольной декартовой координаты контура  $x/(h/2)$

$$\frac{\delta^*}{D} = 0,5 \left( 1 - \sqrt{\frac{U_0}{U_{\max}}} \right), \quad (6)$$

где  $D$  – диаметр трубы;  $U_0$ ,  $U_{\max}$  – средняя и максимальная скорости в трубе. Используя (6), получим  $\delta^*/D = 0,0455$ .

Примем, что в нашем случае  $D = a$ . Проинтегрируем (5) по  $\xi$  с учетом (6) и получим

$$1 + \frac{ma}{R} = \left( 1 + \frac{ma}{R_0} \right) \exp \left( -k \frac{\xi}{a} \right), \quad (7)$$

где  $R_0$  – начальный радиус кривизны;  $\xi$  – продольная координата, отсчитываемая вдоль внутренней стенки от начала изменения радиуса кривизны;  $k = \zeta(D/\delta^*) = 22\zeta$  – перенормированный критерий отрыва (в случае отрыва  $k = 3,3$ ).

Решая задачу в обычных декартовых координатах  $x$  и  $y$  и используя выражение для второй производной кривой через ее кривизну, запишем

$$\frac{dz}{dx} = \frac{a}{R} (1 + z^2)^{3/2}, \quad \frac{dy}{dx} = z, \quad d\xi = a \sqrt{dx^2 + dy^2}. \quad (8)$$

Расчет сглаживающего контура поворота проводился следующим образом: задавался начальный радиус  $R_0$  и ширина перегородки, считалось, что поворот осуществляется на  $180^\circ$ , в конце поворота кривизна равна нулю. В процессе счета варьировалась величина  $k$  таким образом, чтобы выполнялись определенные выше условия. В результате расчета определялись начальный угол  $\phi_0$ , с которого начинается изменение радиуса кривизны, и координаты контура внутренней стенки канала при повороте потока. Координаты внешней стенки и осевой линии могут быть пересчитаны заданием соответствующих расстояний по нормали к внутренней стенке. Предполагалось, что по технологическим соображениям вход и выход выполняются симметричными.

На рис. 3 представлено изменение относительной кривизны  $(h/2)/R$  контура внутренней стенки канала в зоне поворота, рассчитанной для случая отношения ширины канала к ширине перемычки  $a/h = 2$  и относительного начального радиуса кривизны внутренней стенки канала  $R_0/(h/2) = 0,8$ . Здесь  $x$  – продольная декартова координата контура (см. рис. 2).

Из рис. 3 видно, что кривизна контура уменьшается до нуля с уменьшением  $x$  ( $\xi$  увеличивается), после чего начинается прямолинейный участок канала. Вначале в интервале  $x/(h/2) = 0,8 \div 0,69$  кривизна постоянна и равна  $(h/2)/R = 1,25$ , что соответствует постоянному начальному радиусу кривизны  $R_0$  в области угла поворота  $\varphi_0 = 31^\circ$ .

На рис. 4 представлено изменение критерия отрыва турбулентного пограничного слоя  $\zeta$  ( $I$ ) в зависимости от относительного начального радиуса поворота  $R_0/(h/2)$ , рассчитанного для случая отношения ширины канала к ширине перемычки  $a/h = 2$ .

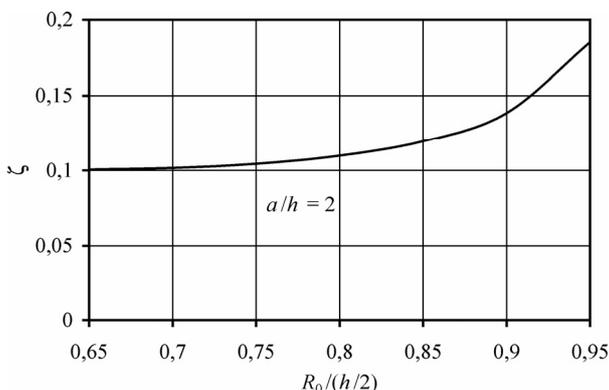


Рис. 4. Изменение критерия отрыва  $\zeta$  в зависимости от относительного начального радиуса поворота  $R_0/(h/2)$

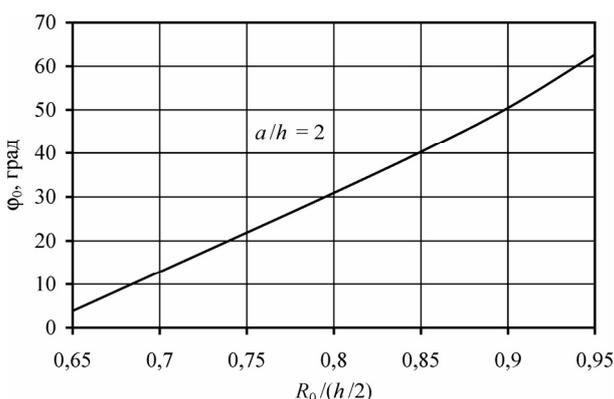


Рис. 5. Изменение начального угла поворота  $\varphi_0$  в зависимости от относительного радиуса поворота  $R_0/(h/2)$

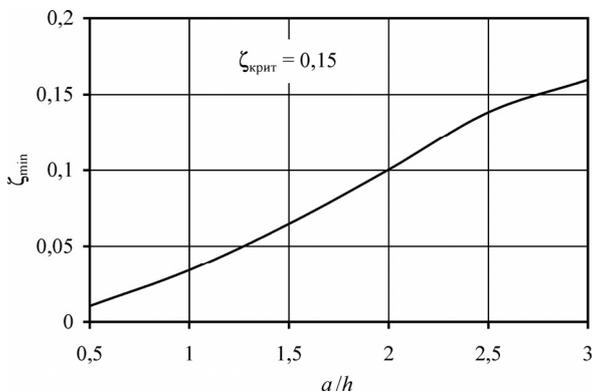


Рис. 6. Зависимость критического значения критерия Бам-Зеликовича  $\zeta_{\min}$  от отношения ширины канала к ширине перемычки  $a/h$

Из рис. 4 видно, что с ростом  $R_0/(h/2)$  растет  $\zeta$ . Значительный рост  $\zeta$  начинается примерно с  $R_0/(h/2) = 0,8$ . Отметим, что при  $a/h = 2$  минимальное значение  $R_0/(h/2)$  составляет  $R_0/(h/2) = 0,64$ , а критическое значение критерия отрыва турбулентного пограничного слоя, равное  $\zeta = 0,15$ , достигается примерно при  $R_0/(h/2) = 0,91$ .

На рис. 5 представлено изменение начального угла поворота  $\varphi_0$  в зависимости от относительного начального радиуса поворота  $R_0/(h/2)$ , рассчитанное для случая отношения ширины канала к ширине перемычки  $a/h = 2$ .

Из рис. 5 видно, что с ростом  $R_0/(h/2)$  растет  $\varphi_0$ . Так, при минимальном значении  $R_0/(h/2)$ , равном  $R_0/(h/2) = 0,64$ ,  $\varphi_0 = 0$ , а при  $R_0/(h/2) = 0,8$ , соответствующем началу значительного роста  $\zeta$ ,  $\varphi_0 = 30^\circ$ , при  $R_0/(h/2) = 0,91$ , соответствующем достижению критического значения критерия отрыва  $\zeta = 0,15$ , значение  $\varphi_0 = 53^\circ$ .

На рис. 6 представлено изменение минимально возможного (по  $R_0/(h/2)$ ) значения  $\zeta_{\min}$  в зависимости от отношения ширины канала к ширине перемычки  $a/h$ . Расчет выполнен для  $m = 0,5$ .

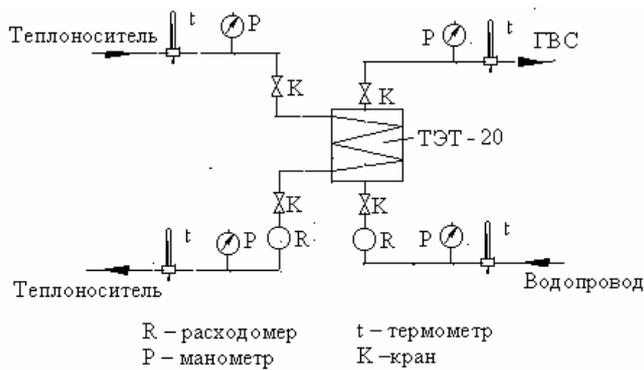
Из рис. 6 видно, что  $\zeta_{\min}$  растет с ростом  $a/h$ . Минимально возможную перемычку без отрыва потока ( $\zeta_{\min} = 0,15$ ) возможно реализовать при  $a/h < 2,7$ .

Таким образом, если принять достаточно компактный теплообменник с  $a/h = 2$ , то  $R_0/(h/2) = 0,8$ ,  $\varphi_0 = 30^\circ$ ,  $\zeta = 0,1$ ,  $x_{\text{кон}}/(h/2) = -1,2$ . При этом общая длина (по  $x$ ) поворота составит  $h$ .

Испытания опытного образца теплообменника проведены в МП «Теплоцентр» (г. Жуковский Московской области). При проведении испытаний проводились следующие измерения (схема подключения теплообменника и измерений представлена на рис. 7):

- измерение расхода нагреваемой воды  $G_1$ ;
- измерение расхода теплоносителя  $G_2$ ;
- измерение температуры нагреваемой воды на входе теплообменника  $T_{10}$ ;
- измерение температуры нагреваемой воды на выходе теплообменника  $T_{1K}$ ;
- измерение температуры теплоносителя на входе теплообменника  $T_{20}$ ;
- измерение температуры теплоносителя на выходе теплообменника  $T_{2K}$ ;
- измерение давления в контуре нагреваемой воды на входе в теплообменник  $p_{10}$ ;
- измерение давления в контуре нагреваемой воды на выходе из теплообменника  $p_{1K}$ ;
- измерение давления в контуре теплоносителя на входе в теплообменник  $p_{20}$ ;
- измерение давления в контуре теплоносителя на выходе из теплообменника  $p_{2K}$ ;
- измерение сопротивления теплообменника по нагреваемой воде  $\Delta p_1 = p_{10} - p_{1K}$ ;
- измерение сопротивления теплообменника по теплоносителю  $\Delta p_2 = p_{20} - p_{2K}$ .

Испытания скоростного теплообменника проводились при температурах нагреваемой воды и теплоносителя на входах в теплообменник, определяемых системой горячего водоснабжения МП «Теплоцентр».



7. Схема экспериментального стенда для проведения испытаний теплообменника

При проведении испытаний задавались расходы нагреваемой воды и теплоносителя, соответствующие скорости потока воды в контуре нагреваемой воды,  $U_1 = 1 \div 2$  м/с. За время 69 сут через контур нагреваемой воды протекло  $660 \text{ м}^3$  воды, при этом средний расход воды составил  $0,11 \text{ кг/с}$ , а скорость  $U_1 = 1,6$  м/с. На рис. 8 представлены результаты (залитые квадратные значки) изменения по времени  $\tau$  мощности теплообменника по нагреваемой воде  $N_1$ , отнесенной к начальной мощности  $N_{10}$  (без осадкоотложения), также представлена экспоненциальная кривая, аппроксимирующая результаты испытаний. Видно, что из-за наростшего слоя отложения солей на стенках теплообменника после испытания в течение 69 сут мощность уменьшилась на 30%. После 25 сут испытания мощность практически не меняется и говорит о том, что толщина слоя отложения солей жесткости стабилизируется при высокой скорости протока нагреваемой жидкости ( $U_1 = 1 \div 2$  м/с).

По окончании испытаний были проведены разборка и осмотр теплообменника. Осмотр теплообменных пластин после разборки показал следующее: в канале теплообменника для нагреваемой воды на стенках канала наблюдается рыхлый влажный слой отложения бурого цвета, равномерно наростший на дне и стенках канала. По виду отложений в области поворота канала не отмечено каких-либо особенностей.

Таким образом, показано, что по виду отложений в области поворота канала не отмечено каких-либо особенностей, что говорит об отсутствии рециркуляционных (отрывных) зон на выходе из поворота в каналах теплообменника.

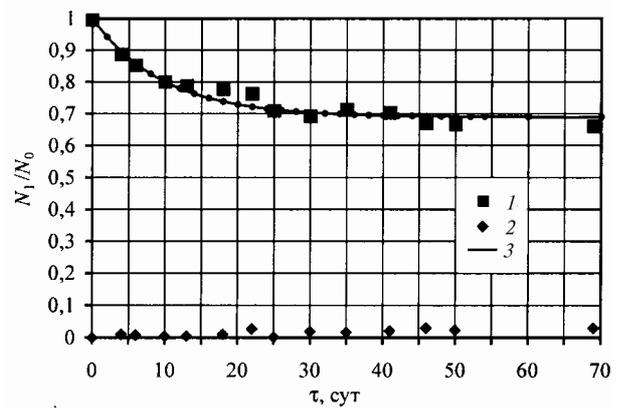


Рис. 8. Зависимость изменения относительной мощности теплообменника  $N_1/N_0$  по времени  $\tau$ :

1 — экспериментальные данные; 2 — среднеквадратичная ошибка измерений; 3 — экспоненциальная кривая, аппроксимирующая результаты испытаний

### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $\zeta$  — критерий Бам-Зеликовича (критерий отрыва);
- $\zeta_{\min}$  — минимально возможное (критическое) значение критерия Бам-Зеликовича;
- $\xi$  — продольная координата, отсчитываемая вдоль поверхности внутренней стенки (см. рис. 2), м;
- $\delta^*$  — толщина вытеснения, м;
- $\rho$  — плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;
- $U$  — скорость жидкости, м/с;
- $R$  — локальный радиус поворота при угле  $\varphi$ , м;
- $\varphi$  — локальный угол поворота, град;
- $\eta$  — поперечная координата, отсчитываемая по нормали к поверхности внутренней стенки (см. рис. 2), м;
- $x_{\text{кон}}$  — координата конечной точки поворота, м;
- $a$  — ширина канала, м;
- $b$  — высота канала, м;
- $h$  — ширина перемычки между прямолинейными участками канала, м;
- $D$  — эквивалентный диаметр, м;
- $m$  — параметр, определяющий линию тока ( $m = 0,5$  — осевая линия тока);
- $k$  — перенормированный критерий отрыва (в случае отрыва  $k = 3,3$ ).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. ЕР 0 183 008 В1, кл. F28F 3/08.
2. Пат. ЕР 1 136 782 А1, кл. F28F 3/08, F28D 9/02.
3. Пат. ЕР 0 327 574 В1, кл. F28F 3/08, F28F 17/00, В21D 53/14.
4. Пат. ЕР 0 463 298 В1, кл. F28F 3/08.
5. Евсеев Г.А. Инженерный метод расчета плоского теплообменника «жидкость–жидкость» с прямоугольными каналами // Энергосбережение и водоподготовка. 2005. №4.
6. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. М.-Л., 1959.
7. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975.
8. Евсеев А.Г., Евсеев Г.А., Капичников А.А., Ткач В.А. Теплообменник «жидкость–жидкость» для горячего водоснабжения: Пат. РФ №2236660 с приоритетом от 11.09.02.
9. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1969.