

# ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 4152

(13) U

(46) 2008.02.28

(51) МПК (2006)

F 28D 7/00

F 28F 1/24

F 25D 7/00

(54)

## МОДЕЛЬ ТРУБНОГО ПУЧКА

(21) Номер заявки: u 20070520

(22) 2007.07.12

(71) Заявитель: Учреждение образования  
"Белорусский государственный техно-  
логический университет" (ВУ)

(72) Авторы: Кунтыш Владимир Борисо-  
вич; Санкович Евгений Савельевич;  
Позднякова Анна Владимировна (ВУ)

(73) Патентообладатель: Учреждение обра-  
зования "Белорусский государственный  
технологический университет"  
(ВУ)

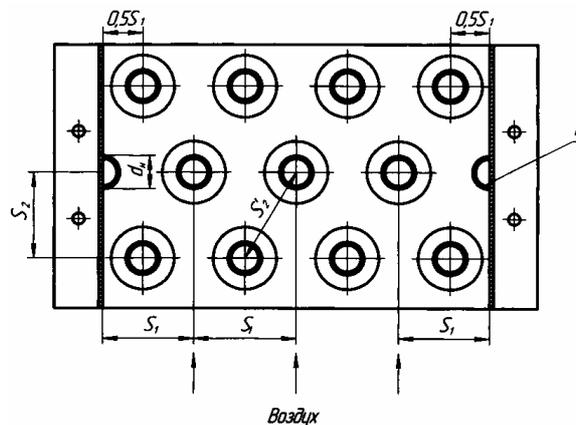
(57)

Модель трубного пучка, состоящая из горизонтально расположенных обогреваемых круглых труб со спиральными ребрами натуральных размеров с коридорным или шахматным расположением их в трубных решетках, скрепленных между собой стяжками, и боковых ограждающих щитков с полутрубками - вытеснителями, отличающаяся тем, что количество цельных труб в каждом поперечном ряду модели коридорного и нечетных рядах шахматного пучков должно быть не меньше четырех, а в четных рядах этого пучка на одну трубку меньше, при этом в этих рядах на боковых ограждающих щитках устанавливаются гладкие полутрубки наружного диаметра, равного диаметру трубы по основанию ребер.

(56)

1. Бессонный А.Н., Дрейцер Г.А., Кунтыш В.Б. и др. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: Справочник / Под общ. ред. В.Б. Кунтыша, А.Н. Бессонного. - СПб.: Недра, 1996. - С. 71-87, 89-91.

2. Бажан П.И., Каневец Г.Е., Селиверстов В.М. Справочник по теплообменным аппаратам. - М.: Машиностроение, 1989. - С. 62-70.



Фиг. 2

ВУ 4152 U 2008.02.28

3. Кутателадзе С.С., Ляховский Д.Н., Пермяков В.А. Моделирование теплоэнергетического оборудования. - М. - Л.: Энергия, 1966. - С. 62-70.
4. Гусев С.Е., Шкловер Г.Г. Свободно-конвективный теплообмен при внешнем обтекании тел. - М.: Энергоатомиздат, 1992. - С. 107-108.
5. Мильман О.О., Алешин Б.А. Экспериментальное исследование теплообмена при естественной циркуляции воздуха в модели воздушного конденсатора с вытяжной шахтой // Теплоэнергетика. - 2005. - № 5. - С. 16-19.
6. Самородов А.В. Исследование свободно-конвективного теплообмена трехрядных наклонных шахматных пучков из труб с накатными спиральными ребрами // Изв. вузов. Энергетика. - 1998. - № 2. - С. 76-82 (прототип).

---

Полезная модель относится к технике моделирования тепловых процессов, а более конкретно предназначается для экспериментального исследования свободно-конвективного теплообмена коридорных и шахматных пучков из круглоребристых труб в потоке воздуха.

Коридорные и шахматные пучки из ребристых труб широко применяются в теплообменных секциях аппаратов воздушного охлаждения (АВО) продуктов разделения нефти на составляющие компоненты в ректификационных установках, для охлаждения компримированного природного газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов [1], в производстве минеральных аммиачных удобрений, в газоперерабатывающей промышленности, в калориферах различного функционального назначения [2] и охладителях наддувочного воздуха дизелей, в конденсаторах холодильных и теплонасосных установок, в теплоутилизаторах вентиляционных выбросов промышленных цехов и зрелищных залов.

Основной сборочной единицей трубных пучков указанных поверхностных рекуперативных теплообменников являются круглые трубы со спиральными или кольцевыми ребрами, изготовленные из высокотеплопроводных материалов, преимущественно алюминия и его сплавов [1], который устойчив к атмосферной коррозии наружного воздуха. Оребрение снаружи омывается воздушным потоком. Трубы в пучках преимущественно располагаются горизонтально.

Компоновочными параметрами пучка являются поперечный (фронтальный) шаг  $S_1$ , продольный шаг  $S_2$ , а для шахматного пучка также диагональный шаг  $S_2'$  и число поперечных рядов труб  $z$  по направлению движения воздуха, которое может изменяться от одного до нескольких рядов. Количество труб  $i$  в поперечном ряду может изменяться от нескольких штук до десятков штук. Для организованного движения воздуха в межтрубном пространстве с боковых сторон пучков промышленных теплообменников установлены ограждающие щитки высотой не менее  $(S_2 \cdot z + d)$ , где  $d$  - наружный диаметр ребра.

В целях экономии потребления электрической энергии приводом вентиляторов, осуществляющих принудительное движение воздуха через пучок, при некоторых режимах работы технологической установки и параметрах наружного воздуха отключают вентиляторы или часть их и переводят работу теплообменников в условия свободно-конвективного теплообмена. Этот способ энергосбережения особенно находит применение в настоящее время при эксплуатации АВО в зимний и переходный периоды года, при которых наружная температура охлаждающего воздуха ниже в сравнении с расчетной [1], принимаемой при проектировании АВО.

Теплоотвод от охлаждаемого продукта осуществляется свободной циркуляцией воздуха через трубный пучок. Для построения системы автоматического регулирования температуры охлаждаемого продукта отключением вентиляторов необходимы данные по интенсивности свободно-конвективного теплообмена воздуха в пучках из круглоребри-

стых труб, то есть средние коэффициенты теплоотдачи воздуха при его естественном движении поперек труб.

Основным способом определения коэффициентов теплоотдачи при свободном движении является метод экспериментального исследования моделей трубных пучков тепловым моделированием. Модель трубного пучка представляет укороченный пучок из ребристых труб натуральных размеров, действительных значений шагов  $S_1$ ,  $S_2$  и числа рядов  $z$ , соответствующих промышленному образцу [3]. Длина труб не имеет принципиального значения, так как модель пучка можно рассматривать как вырезку промышленного образца пучка с натуральными по двум осям размерами, то есть в направлении ширины (фронтальный размер) и глубины пучка, зависящий от числа поперечных рядов  $z$ . Длина труб модели пучка выбирается таковой, чтобы относительные торцовые потери тепла моделью не превышали этой характеристики в образце. Однако на достаточное количество труб  $i_d$  в каждом поперечном ряду модели теория моделирования указаний не дает. Следует исходить из условия, что оно должно быть таким, чтобы в модели воспроизводилась гидродинамика потока, подобная образцу.

Известны [4] модели горизонтальных коридорного и шахматного пучков для исследования теплоотдачи в свободном потоке воздуха. Отличительной особенностью моделей пучков является отсутствие боковых ограждающих щитков и наличие в моделях только цельных труб. По данным визуальных наблюдений течения воздуха в межтрубных пространствах моделей констатировано, что каждый поперечный ряд модели коридорного пучка должен иметь  $i = 5$  труб, а в модели шахматного пучка в нечетных рядах следует устанавливать  $i = 5$  труб, а в четных  $i = 6$  труб. Тепловые исследования моделей не проводились. Модель шахматного пучка выполнена с нарушениями правил моделирования: проходное сечение для воздуха в шахматном пучке различно для нечетных и четных рядов труб, что не соответствует образцу промышленного теплообменника.

Известна [5] модель горизонтального шахматного пучка воздушного конденсатора для экспериментального исследования коэффициентов теплоотдачи при естественной циркуляции воздуха, образцом которой является теплообменная секция АВО. Модель состояла из труб со спиральными алюминиевыми ребрами наружного диаметра  $d = 57$  мм и длиной ребренной части 300 мм, включала четыре поперечных ряда, в каждом из которых находилось по  $i = 5$  штук цельных труб, расположенных с шагом  $S_1 = 59$  мм. Все трубы модели обогревались горячей водой, проходящей внутри их. Для обеспечения одинакового проходного сечения каждого поперечного ряда для воздуха в модели применены боковые ограждающие щитки с полукруглыми выштамповками в сечениях расположения четных поперечных рядов. Кроме этого, щитки предотвращают боковой подсос воздуха в модель и создают организованное равномерное по ширине модели движение воздуха. Видимо совокупное действие этих факторов явилось основанием для принятия решения о достаточности пяти труб  $i_d = 5$  штук в ряду для получения достоверных значений коэффициентов теплоотдачи на модели натурному образцу пучка.

Применение усложненной конструкции щитков увеличивает стоимость модели, требует большего числа операций на стадии сборки, но самое главное - полное отсутствие данных о соответствии измеренных коэффициентов теплоотдачи модели таковым образцу, так как в образце вместо выштамповок на боковых щитках устанавливаются полутрубки [1], получаемые в результате продольной разрезки цельных труб на две половинки по диаметральному сечению.

Наиболее близкой к заявляемой модели по технической сущности и достигаемым результатам является модель трубного пучка [6], которая принята нами за прототип. Модель предназначена для теплового моделирования средних коэффициентов теплоотдачи при свободном движении воздуха через ребренные трубные пучки теплообменных секций АВО.

Модель представляет трехрядный шахматный пучок из натуральных круглых труб со спиральными алюминиевыми ребрами с диаметром  $d = 55,6$  мм и длиной 300 мм, обогре-

ваемых электрическим током. Трубы установлены между трубными досками, выполненными из термостойкой фанеры, а доски между собой скреплены четырьмя стальными анкерными стяжками. С боковых сторон пучок модели ограничен щитками, которые препятствуют подосу холодного воздуха по его высоте. Щитки конструктивно представляют гладкие пластины прямоугольного поперечного сечения и были изготовлены из той же фанеры, что и трубные доски. В нечетных рядах модели установлены полутрубки, полученные продольной разрезкой цельных ребристых труб. В четном ряду расположено шесть цельных ребристых труб ( $i = 6$  штук), а в нечетных 1-ом и 3-ем по 5 цельных труб, но с боков смонтированы по 2 ребристых полутрубки. Свободное движение воздуха в модели осуществляется снизу вверх. Наклон пучка можно изменять от горизонтального положения до наклона в  $60^\circ$ , измеренного между продольной осью труб и горизонтальной плоскостью.

Таким образом, в модели выполнены все условия моделирования теплообмена трубных натуральных пучков (образца).

Принципиальным недостатком модели является полностью необоснованное и не подтвержденное хотя бы гипотетически принятое техническое решение по назначению числа труб в поперечном ряду, что характерно и для прочих моделей, анализируемых в представленной заявке. Следует лишь надеяться, что интуиция автора прототипа [6] не подвела и количество установленных труб в ряду  $i_{уст}$  будет достаточным  $i_d$  или больше его, то есть  $i_{уст} > i_d$  для получения достоверных значений среднего коэффициента теплоотдачи модели пучка образцу. Но далее в этом случае может оказаться, что при  $i_d < i_{уст}$  произойдет перерасход электрической или тепловой энергии на обогрев труб модели, никак не требуемый для измерения достоверных значений теплоотдачи.

Установка ребристых полутрубок требует перевода кондиционных труб в дорогостоящие отходы, которые в последующем не могут быть полезно использованы для теплообмена. Возникает вопрос - нельзя ли заменить ребристые полутрубки гладкими с диаметром, равным диаметру ребристой трубки по основанию ребер при сохранении достоверности измеренного коэффициента теплоотдачи?

Задача полезной модели - энергосбережение при экспериментальном исследовании средних коэффициентов теплоотдачи свободно-конвективного теплообмена в коридорных и шахматных пучках из ребристых труб уменьшением потребления электрической или тепловой энергии, снижение металлоемкости, экономия материальных затрат с учетом обеспечения достоверности полученных результатов исследования.

Поставленная задача достигается тем, что модель трубного пучка состоит из горизонтально расположенных обогреваемых круглых труб со спиральными ребрами натуральных размеров с коридорным или шахматным расположением их в трубных досках, скрепленных между собой стяжками, и боковых ограждающих щитков с полутрубками-вытеснителями, отличается тем, что количество цельных труб в каждом поперечном ряду модели коридорного и нечетных рядах шахматного пучков должно быть не меньше четырех, а в четных рядах этого пучка на одну трубку меньше, при этом в этих рядах на боковых ограждающих щитках устанавливаются гладкие полутрубки наружного диаметра, равного диаметру труб по основанию ребер. Исследования и анализ картин линий тока при свободном движении воздуха через межтрубное пространство горизонтальных моделей пучков из круглых труб со спиральными ребрами с разным количеством труб в поперечном ряду показали, что подобие скоростных полей модели и образца наступает при установке в модели в каждом ее поперечном ряду коридорного и нечетных рядах шахматного пучков количества труб, равного  $i = 4$ -ом, а в четных рядах после установки  $i = 3$ -х труб, но здесь устанавливают у боковых щитков ребристые полутрубки. Достижение идентичной гидродинамики свободного потока в модели образцу является одним из необходимых условий получения достоверных значений средних коэффициентов теплоотдачи.

Для трехрядного шахматного пучка уменьшение потребления электрической энергии составляет 31 % по сравнению с прототипом и на 27 % снизится потребление тепловой энергии по отношению с моделью - аналогом [5]. Внедрение в технику моделирования заявляемой модели трубного пучка сопровождается снижением металлоемкости каждого опытного (экспериментального) пучка не менее чем на 27 % с соответствующей и даже большей экономией материальных затрат.

Толщина спиральных ребер промышленных теплообменных труб невелика, в среднем  $0,5 \div 0,7$  мм. Поэтому наличие их на полутрубках не вносит существенного вклада в загромождение поперечного сечения ряда по сравнению с его загромождением миделевым сечением несущей трубы, на которой они расположены. Вследствие этого целесообразно заменить ребристые полутрубки на гладкие наружного диаметра, равного диаметру трубы по основанию ребер. Такое техническое решение не скажется на гидродинамике воздуха в этих поперечных рядах модели, но уменьшится потребность в цельных ребристых трубах и снизятся затраты на создание модели для опытного исследования, меньшей будет стоимость, а высвободившиеся ребристые трубы используются по прямому функциональному назначению.

Таким образом, в заявляемой модели трубного пучка полностью решены сформулированные задачи.

Полезная модель поясняется чертежами: на фиг. 1 изображен поперечный разрез модели коридорного пучка; на фиг. 2 - то же шахматного пучка; на фиг. 3 - график зависимости безразмерной теплоотдачи (числа Нуссельта  $Nu$ ) от количества ребристых труб  $i$  в поперечном ряду модели для однорядного пучка ( $z = 1$ ) при разных значениях числа Грасгофа  $Gr$ ; на фиг. 4 - то же для моделей трехрядных ( $z = 3$ ) пучков, штриховые и сплошные линии соответственно для коридорных и шахматных компоновок.

Модель трубных пучков состоит из горизонтально расположенных обогреваемых круглых труб 1 со спиральными ребрами натуральных размеров, трубных досок 2, боковых ограждающих щитков 3, стяжек 4 и гладких патрубков 5.

В трубных досках 2 из бакелитовой фанеры толщиной  $3 \div 5$  мм ребристые трубы 1 размещены в коридорном или шахматном порядке с поперечным шагом  $S_1$ , продольным  $S_2$  и диагональным  $S_2'$ . Трубные доски между собой соединены стяжками 4, а с боковых сторон модель имеет боковые ограждающие щитки 3 из той же фанеры. При шахматной компоновке в четных рядах с боковых сторон установлены полутрубки 5. Модель трубного пучка действует следующим образом.

Горизонтально расположенные круглоребристые трубы 1 обогревают горячей водой, проходящей внутри, или иным способом, например конденсирующимся внутри паром, или вставленными внутрь труб нихромовыми проволочными нагревателями, пропускаемая через них электрический ток. Подведенный тепловой поток передается через трубы к наружной поверхности их и далее отводится конвекцией и излучением воздухом, движущимся через межтрубное пространство модели. Движение воздуха возникает вследствие разности плотностей его у нагретой поверхности и вне (снаружи) пучка модели. Следовательно, в модели пучка протекает свободно-конвективный теплообмен благодаря естественному без внешних побудителей течению воздуха. Боковые щитки 3 препятствуют подтоку свежих извне масс воздуха по высоте пучка и обеспечивают его равномерное течение. Полутрубки 5 выравнивают скорости по каждому поперечному ряду. Естественное течение (движение) воздуха происходит снизу вверх.

Для проверки надежности принятых технических решений в заявляемой модели трубного пучка по итогам качественного анализа картины естественного течения воздуха через межтрубное пространство пучков нами проведено экспериментальное исследование средних коэффициентов теплоотдачи моделей пучков с различным количеством труб в поперечном ряду и разным числом поперечных рядов. Целью этого исследования являлось получение количественных данных по интенсивности теплообмена и их взаимосвязи

с количеством труб в ряду. В такой постановке опыт, как критерий истины, должен подтвердить или опровергнуть отличительные признаки (свойства) заявляемой модели.

Методика проведения опытов и обработка результатов измерений осуществлены в соответствии с работой [6] и являются общепринятыми для такого характера экспериментов. Обогрев осуществлялся электрическим током.

Модели пучков собирались из труб со спиральными алюминиевыми ребрами, мм:  $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta = 55,6 \times 26,6 \times 14,5 \times 2,91 \times 0,75$ . Здесь  $d$ ,  $d_0 = d - 2h$ ,  $h$ ,  $s$ ,  $\Delta$  - соответственно наружный диаметр ребра, диаметр трубы по основанию ребер; высота, шаг и средняя толщина ребра. Внутренний диаметр трубы был 21 мм. Коэффициент оребрения трубы  $\phi = 16,69$ . Теплоотдающая длина труб, равная длине между трубными досками, составляла 300 мм. Поперечный шаг  $S_1 = 61$  мм, а продольный шаг для коридорных пучков  $S_2 = 58$  мм, шахматных пучков  $S_2 = 53$  мм. Средняя температура поверхности труб у основания ребер изменялась в интервале  $30 \div 215$  °С, температура окружающего воздуха  $t_0 = 7 \div 20$  °С. Результаты опытов представлялись в числах подобия  $Nu = \alpha d_0 / \lambda$ ,  $Gr = \beta g d_0^3 (t_{ст} - t_0) / \nu^2$ , где  $\alpha$  - средний коэффициент теплоотдачи пучка при свободной конвекции воздуха, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\beta$  - коэффициент объемного расширения воздуха, К<sup>-1</sup>;  $t_{ст}$  - средняя температура поверхности труб у основания ребер, °С;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> - ускорение свободного падения;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);  $\nu$  - коэффициент кинематической вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с. Свойства воздуха  $\lambda$ ,  $\nu$ ,  $\beta$  принимались по его температуре  $t_0$ .

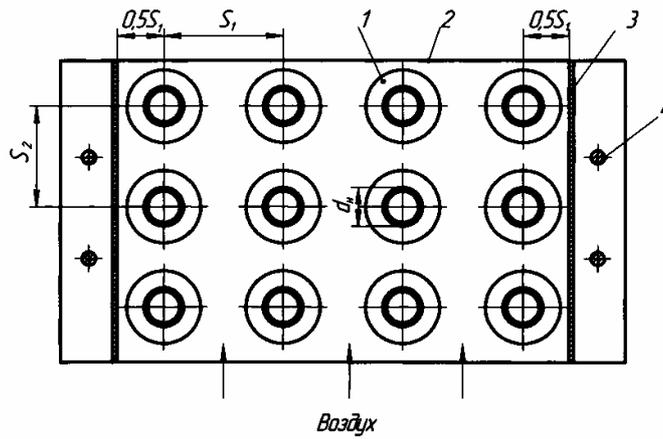
На фиг. 3 представлены графики, отражающие зависимость безразмерной свободно-конвективной теплоотдачи  $Nu$  от количества труб  $i$ , шт., в модели однорядного пучка для значений  $Gr - I = 71430$ ,  $II = 357140$ ,  $III = 500000$ . Опытные значения теплоотдачи  $Nu$  обозначены точками 1, 2, 3, 4, которые соответствуют количеству труб в ряду  $i = 7, 5, 4, 3$  штук.

Число  $Gr$  является однозначно определяющим интенсивность свободно-конвективного теплообмена. С увеличением количества труб в ряду до  $i = 4$  шт. теплоотдача (числа  $Nu$ ) возрастает при всех значениях  $Gr$ , однако при большем количестве труб в поперечном ( $i = 5, 7$  шт.) теплоотдача остается постоянной и равной теплоотдаче четырехтрубного ряда ( $i_d = 4$  шт.).

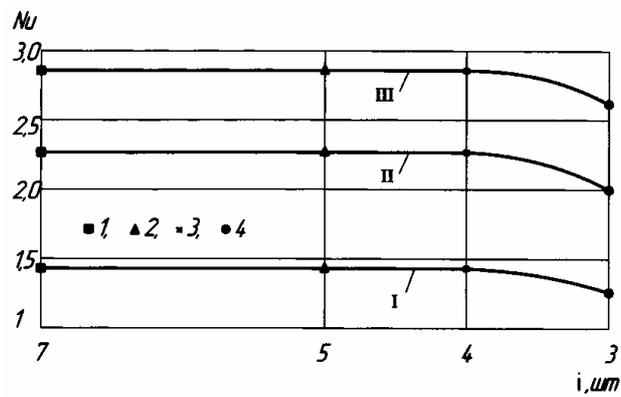
Аналогичная картина влияния количества труб в поперечном ряду на свободно-конвективную теплоотдачу, как видно из фиг. 4, имеет место в коридорных (штриховые линии) и шахматных (сплошные линии) моделях из круглоребристых труб. На этой фигуре также нанесены точками 5 опытные значения  $Nu$  для шахматного пучка с  $i = 4$  трубы, у которого ребристые полутрубки заменены на гладкие полутрубки (фиг. 2) диаметром  $d_0$ . Это конструкторское решение не повлияло на среднюю теплоотдачу пучка.

Таким образом, экспериментальным исследованием подтверждено, что достоверные и надежные данные по свободно-конвективному теплообмену обеспечиваются моделью пучка, в котором каждый поперечный ряд при коридорной компоновке и нечетные ряды с шахматной компоновкой имеют по 4 трубы, а в четных рядах шахматной компоновки следует устанавливать по 3 трубы, а с боковых сторон гладкие полутрубки. Модель пучка будет обладать наименьшими металлоемкостью и материальными затратами. Следовательно, полученное количество труб в ряду будет достаточным  $i_d$ . В случае установки в поперечном ряду модели количества труб  $i_{уст} > i_d$  произойдет перерасход энергии и материальных затрат, не требуемый условиями теплового моделирования.

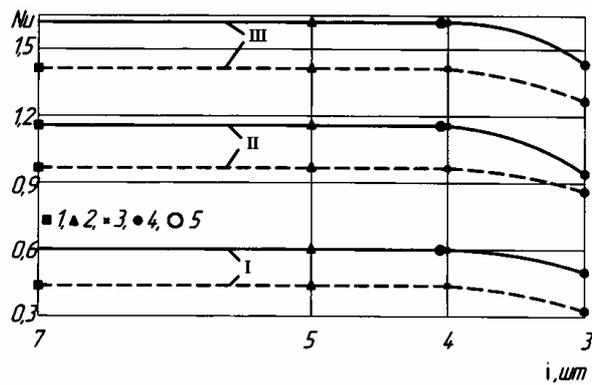
Полезная модель может быть использована при экспериментальном изучении процессов свободно-конвективного теплообмена при внешнем обтекании воздухом коридорных и шахматных пучков из круглых труб со спиральными ребрами, применяемых в газо-жидкостных теплообменниках общего назначения, включая и калориферы.



Фиг. 1



Фиг. 3



Фиг. 4