

**П.И. Орлов**

**Конструкция и расчет деталей авиационных  
двигателей**

**Книга вторая Часть I**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 030  
ББК 92  
П11

П11 **П.И. Орлов**  
Конструкция и расчет деталей авиационных двигателей: Книга вторая Часть I / П.И. Орлов – М.: Книга по Требованию, 2023. – 680 с.

**ISBN 978-5-458-29562-8**

**ISBN 978-5-458-29562-8**

© Издание на русском языке, оформление  
«УОУО Media», 2023  
© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2023

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



## Обозначения

### Общие обозначения

- $D$  — диаметр цилиндра, мм или  $\delta m$   
 $S$  — ход поршня, мм или  $\delta m$   
 $\vartheta = S/D$  — отношение хода поршня к диаметру цилиндра  
 $V_{h_{\text{ц}}}$  — рабочий объем цилиндра, л  
 $i$  — число цилиндров двигателя  
 $V_h$  — рабочий объем двигателя, л  
 $V_c$  — объем камеры сгорания, л  
 $\epsilon$  — степень сжатия  
 $D_{\text{габ}}$  — габаритный диаметр двигателя (звездообразного), мм  
 $d$  — диаметр деталей (например диаметр головки клапана), мм  
 $\Delta$  — зазор (натяг), мм  
 $\psi = \frac{\Delta}{d}$  — относительный зазор (натяг)  
 $n$  — число оборотов двигателя в минуту  
 $v_p = \frac{Sn}{30}$  — средняя скорость поршня, м/сек  
 $v_g$  — средняя скорость газов в горловине клапана, м/сек  
 $N_e$  — эффективная мощность, л. с.  
 $N_{e_{\text{ном}}}$  — номинальная эффективная мощность, л. с.  
 $N_{e_{\text{экс}}}$  — эксплуатационная эффективная мощность, л. с.  
 $N_{e_{\text{max}}}$  — максимальная эффективная мощность, л. с.  
 $N_c$  — мощность, затрачиваемая на привод нагнетателя, л. с.  
 $N_e + N_c$  — эффективная мощность, с учетом мощности, затрачиваемой на нагнетатель, л. с.  
 $p_e$  — среднее эффективное давление, кг/см<sup>2</sup>  
 $p_e$  — доля среднего эффективного давления, затрачиваемая на привод нагнетателя, кг/см<sup>2</sup>  
 $p'_e = p_e + p_c$  — среднее эффективное давление с учетом его доли, затрачиваемой на привод нагнетателя, кг/см<sup>2</sup>  
 $p_k$  — давление во всасывающем трубопроводе, кг/см<sup>2</sup>

*Примечание.* Индекс  $H$  (у обозначений, обведенных фигурной скобкой) указывает, что соответствующее обозначение относится к высоте  $H$ .

- $H$  — высота, м  
 $H_{\text{расч}}$  — расчетная высота, м  
 $N_h$  — литровая мощность, л. с./л  
 $N_p$  — удельная мощность, л. с./ $\delta m^3$   
 $N_{\text{лоб}}$  — лобовая мощность, л. с./ $\delta m^2$   
 $G$  — вес двигателя (сухой), кг  
 $g = \frac{G}{N_e}$  — удельный вес двигателя, кг/л. с.

$$g_h = \frac{G}{V_h} \text{ — литровый вес двигателя, кг/л}$$

$$g_k = \frac{G}{i(D^2S)^{1/4}} \text{ — конструкционный вес двигателя, кг/дм}^2$$

Физико-механические свойства материалов, расчет на прочность

- $\sigma_b$  — временное сопротивление, кг/мм<sup>2</sup>
- $\sigma_p$  — предел пропорциональности, кг/мм<sup>2</sup>
- $\sigma_s$  — предел текучести; кг/мм<sup>2</sup>
- $\sigma_e$  — предел упругости, кг/мм<sup>2</sup>
- $\sigma_w$  — предел усталости, кг/мм<sup>2</sup>
- $\sigma_{w_r}$  — предел усталости при коэффициенте амплитуды напряжений  $r$ , кг/мм<sup>2</sup>
- $\sigma_k$  — крипостойкость, кг/мм<sup>2</sup>
- $a_k$  — ударная вязкость, кгм/см<sup>2</sup>
- $\delta$  — относительное удлинение, %
- $\psi$  — относительное сжатие, %
- $E$  — модуль упругости первого рода, кг/см<sup>2</sup> или кг/мм<sup>2</sup>
- $G$  — модуль упругости второго рода, кг/см<sup>2</sup> или кг/мм<sup>2</sup>
- $H_B$  — число твердости по Бринеллю, кг/мм<sup>2</sup>
- $H_{RC}$  — число твердости по Роквеллу, шкала C
- $H_{RB}$  — число твердости по Роквеллу, шкала B
- $H_V$  — число твердости по Виккерсу
- $\gamma$  — удельный вес, кг/дм<sup>3</sup>
- $\alpha$  — коэффициент линейного расширения
- $\lambda$  — теплопроводность, кал/м<sup>2</sup>час °C
- $\sigma$  — напряжение, кг/см<sup>2</sup>
- $\sigma_u$  — напряжение изгиба, кг/см<sup>2</sup>
- $\sigma_c$  — напряжение сжатия, кг/см<sup>2</sup>
- $\sigma_p$  — напряжение растяжения, кг/см<sup>2</sup>
- $\tau_c$  — напряжение среза, кг/см<sup>2</sup>
- $\tau_k$  — напряжение кручения, кг/см<sup>2</sup>
- $k$  — напряжение смятия, удельное давление, кг/см<sup>2</sup>

Во избежание недоразумений обращаем внимание читателя на то, что сокращение *дм* обозначает (по ОСТ) *дециметры* (а не дюймы).

Цифры в квадратных скобках в тексте обозначают номер литературного источника в библиографическом списке (помещенном в конце каждой главы).

Римскими цифрами обозначены фигуры, которые по техническим условиям пришлось поместить в конце книги.

## І. ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Необходимость легкого и мощного двигателя для осуществления управляемого полета впервые стала очевидной в конце XVII в., когда вызванное потребностями быстро развивавшейся промышленности применение механических двигателей привело к научному исследованию законов движения и связи между силой, скоростью и работой. Если Леонардо-да-Винчи еще совершенно не задумывался о потребных для полета силах, то уже в 1655 г. Роберт Гук, а несколько позднее Борелли доказали, что сила мускулов человеческого тела недостаточна для летания, а Гук даже замыслил изобретение «искусственных мускулов».

Первый действительно летавший механический прибор — модель геликоптера Лонуа и Бьенвеню, демонстрированная ими в 1784 г. в Парижской Академии наук, — приводился в движение пружиной из китового уса. В 1809—1815 гг. английский физик Кейли, первый исследователь теории полета, проектировал установку паровой машины на летательные аппараты. Паровые машины были в то время очень тяжелыми. Жиффар для своего первого дирижабля (1855 г.) смог осуществить паровую машину в 3 л. с. весом 159 кг.

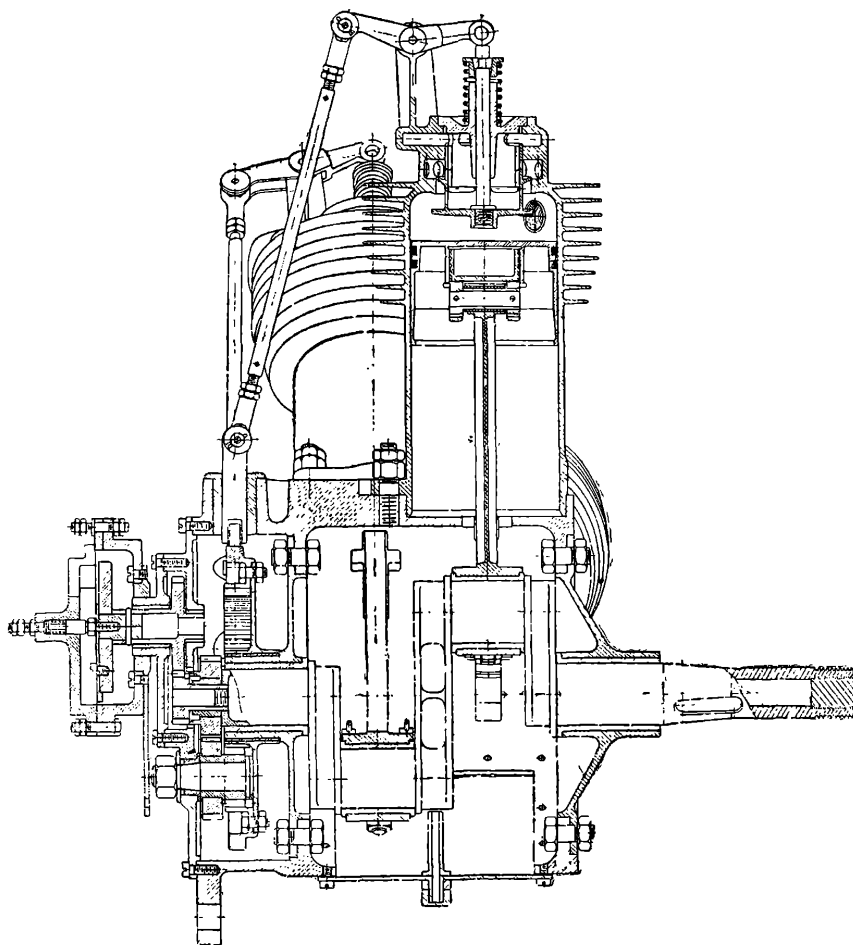
После внедрения паровых машин в военное судостроение и появления трубчатых котлов с быстрым подъемом пара в последней четверти XIX в. стала возможной постройка легкой паровой машины. Хираму Максиму (1892 г.) удалось построить авиационную паросиловую установку мощностью в 300 л. с. весом около 800 кг. Развитие паровой машины как авиационного двигателя на этом и закончилось; лишь в самые последние годы возобновились попытки создать авиационный паровой двигатель. Начиная с 80-х годов, внимание воздухоплавательных кругов было приковано к двигателю внутреннего сгорания.

В 1877 г. Отто осуществил четырехтактный цикл, предложенный в 1861 г. Бо де-Роша, построив четырехтактный газовый двигатель с предварительным сжатием горючей смеси. Это изобретение открыло широкие перспективы повышения экономичности, увеличения мощности и снижения веса двигателя внутреннего сгорания и сделало его серьезнейшим конкурентом парового двигателя. Для того чтобы громоздкий и тяжелый газовый двигатель превратить в транспортный мотор, нужно было прежде всего заменить газ каким-либо транспортабельным топливом и, во-вторых, значительно увеличить литровую мощность двигателя, т. е. повысить его быстроходность. Эти задачи были решены Готлибом Даймлером, построившим в 1885 г. бензиновый автомобильный двигатель с зажиганием от калильной трубки. Благодаря рассчитанной на большое число оборотов конструкции и хорошему наполнению цилиндра (для чего был применен своего рода наддув из кривошипной камеры) число оборотов этого двигателя было доведено до 800—1000 об/мин.

Появление автомобиля с бензиновым двигателем, оказавшегося более совершенным, чем паровые и электрические автомобили, вызвало бурное развитие автомобильной промышленности и усовершенствование бензиновых двигателей. В истории бензиновых двигателей большую роль сыграли работы французского конструктора Фернанда Фореста, впервые применившего обребнение цилиндров и воздушное охлаждение (1881 г.), создавшего двигатель с противоположным движением поршней (1886 г.), многоцилиндровые двигатели с рядным расположением цилиндров (1888 г.) и предложившего блочную конструкцию моторов (1889 г.). Он же еще в 1889 г. детально разработал проект

авиационного двигателя воздушного охлаждения со звездообразным расположением цилиндров, с клепаным стальным картером и с шатунным механизмом из главного и прицепных шатунов такого вида, который применяется до наших дней на всех звездообразных моторах. Расчетный вес этого двигателя составлял всего 1,5 кг на 1 л. с. Двигатель, к сожалению, не был построен.

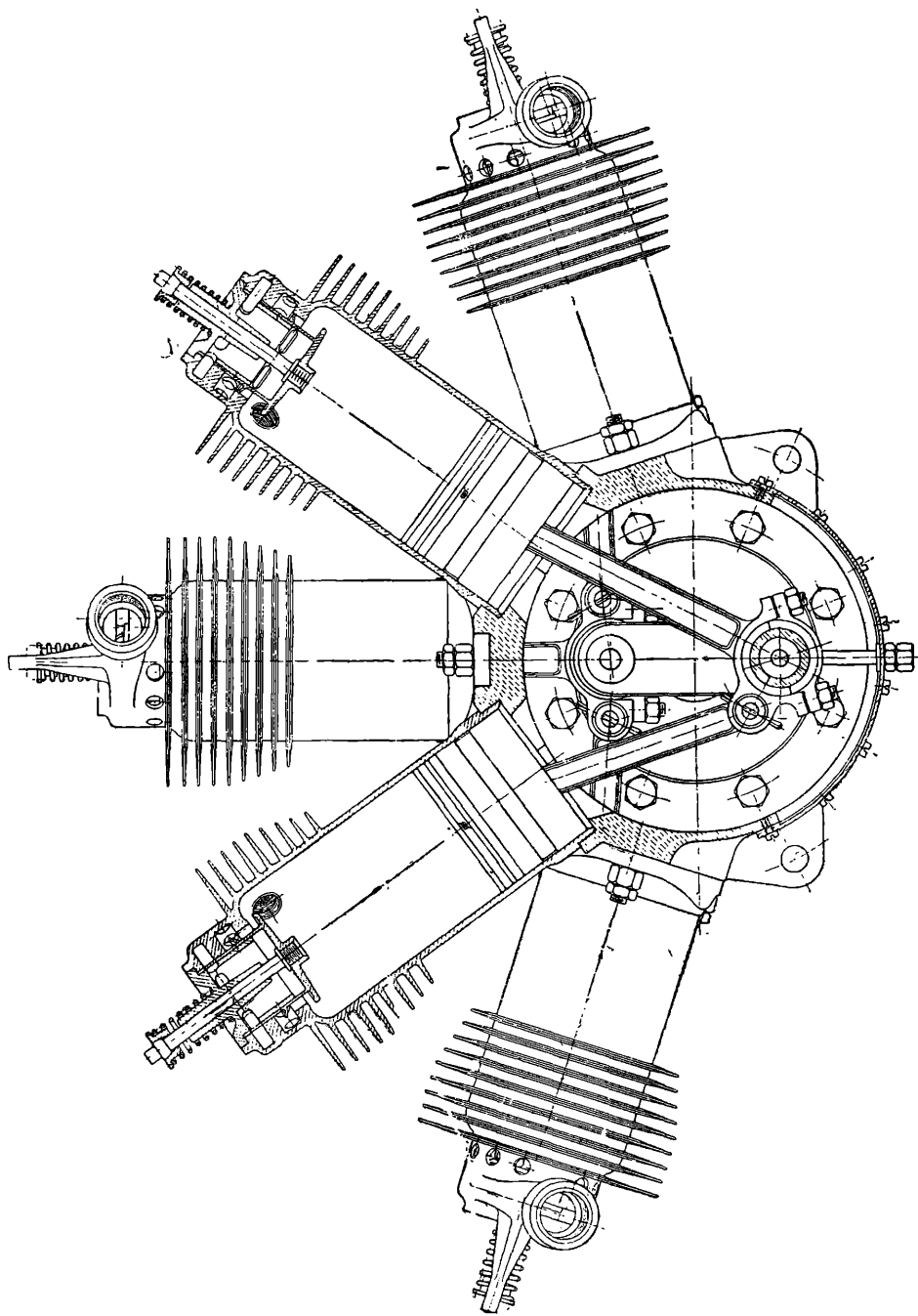
У первых двигателей внутреннего сгорания зажигание осуществлялось при помощи калильных трубок. Изобретенное еще в 1801 г. Филиппом Лебоном и примененное еще в 1864 г. Ленуаром зажигание от электрической искры долгое время оставалось недостаточно надежным. Лишь в конце 80-х годов Роберт Бош создал вполне работоспособную систему зажигания при помощи тока высокого напряжения от магнето. Эта система быстро вытеснила калильные трубки и сделала бензиновый двигатель достаточно безопасным в пожарном отношении.



Фиг. 1. Пятицилиндровый звездообразный двигатель воздушного охлаждения PER конструкции Р. Э. Пельтри (продольный разрез). 1905 г.

Несмотря на эти успехи, ни братьям Вильбуру и Орвилю Райту в США, ни Крессу в Германии (1900—1902 гг.) не удалось найти ни одного завода, который взялся бы построить авиационный двигатель с весом даже в 7—8 кг на 1 л. с. Строителям первых самолетов пришлось самим создавать нужный им двигатель.

Свой первый полет на моторном самолете 17 декабря 1903 г. Орвиль Райт совершил с четырехцилиндровым двигателем автомобильного типа водяного охлаждения с горизонтальными цилиндрами приводившим цепями Гаяля два пропеллера. Диаметр цилиндров и ход двигателя Райт были равны 102 мм, мощность составляла 12—14 л. с при весе 80 кг. Двигатель не имел карбюратора; топливо впрыскивалось во всасывающий патрубок при помощи шестерчатого насоса. Зажигание было от магнето высокого напряжения. Цилиндры и поршни были отлиты из чугуна, коленчатый вал изготовлен из инструментальной стали, картер отлит из алюминиевого сплава, шатун сделан из стальной трубы с навинченной бронзовой кривошипной головкой, головки клапанов — из чугуна, штоки — из стали. В 1904 г. братья Райт построили усовершен-

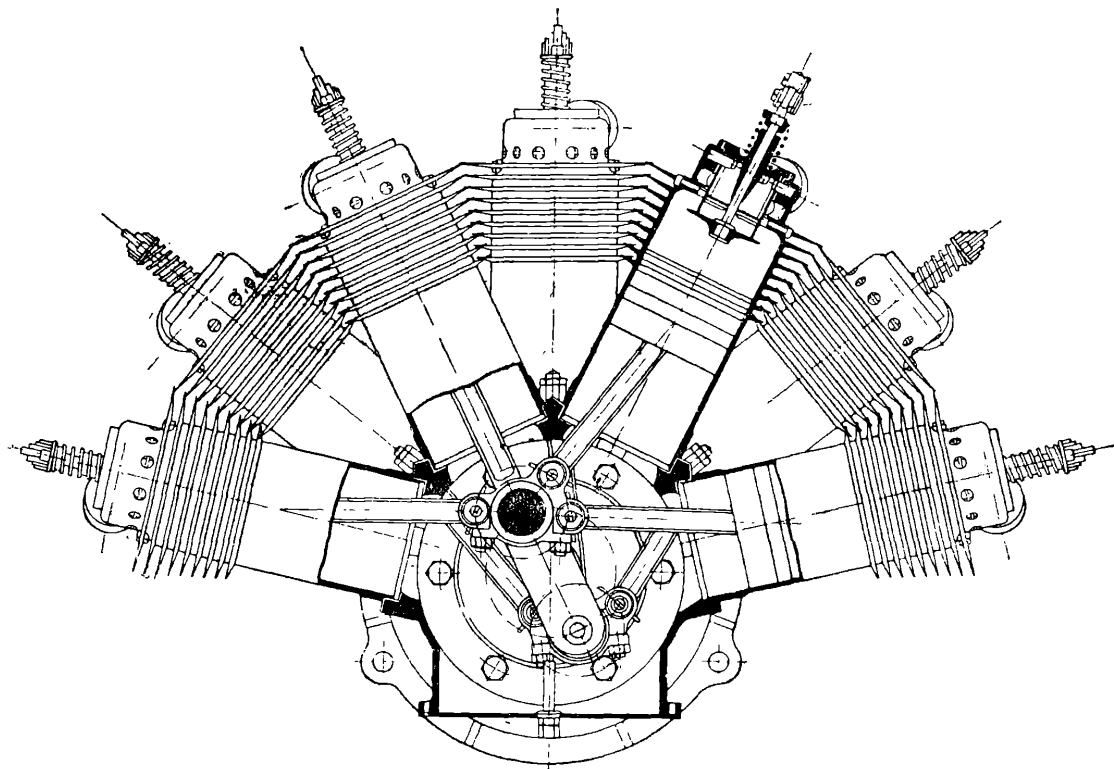


Фиг. 1. Пятицилиндровый веерообразный двигатель воздушного охлаждения PER конструкции Р. Э. Пельтри (поперечный разрез). 1905 г.

ствованный двигатель аналогичного типа, но с вертикальными цилиндрами, мощностью 25—30 л. с. при весе 90 кг, с которым они совершили все свои исторические полеты 1908 г.

В 1902 г. инж. Мэнли в США построил для самолета Лэнгли пятицилиндровый звездообразный мотор водяного охлаждения мощностью 50 л. с. и весом около 57 кг. Из-за неудачи, постигшей самолет Лэнгли, двигатель Мэнли не оказал заметного влияния на развитие авиационных двигателей.

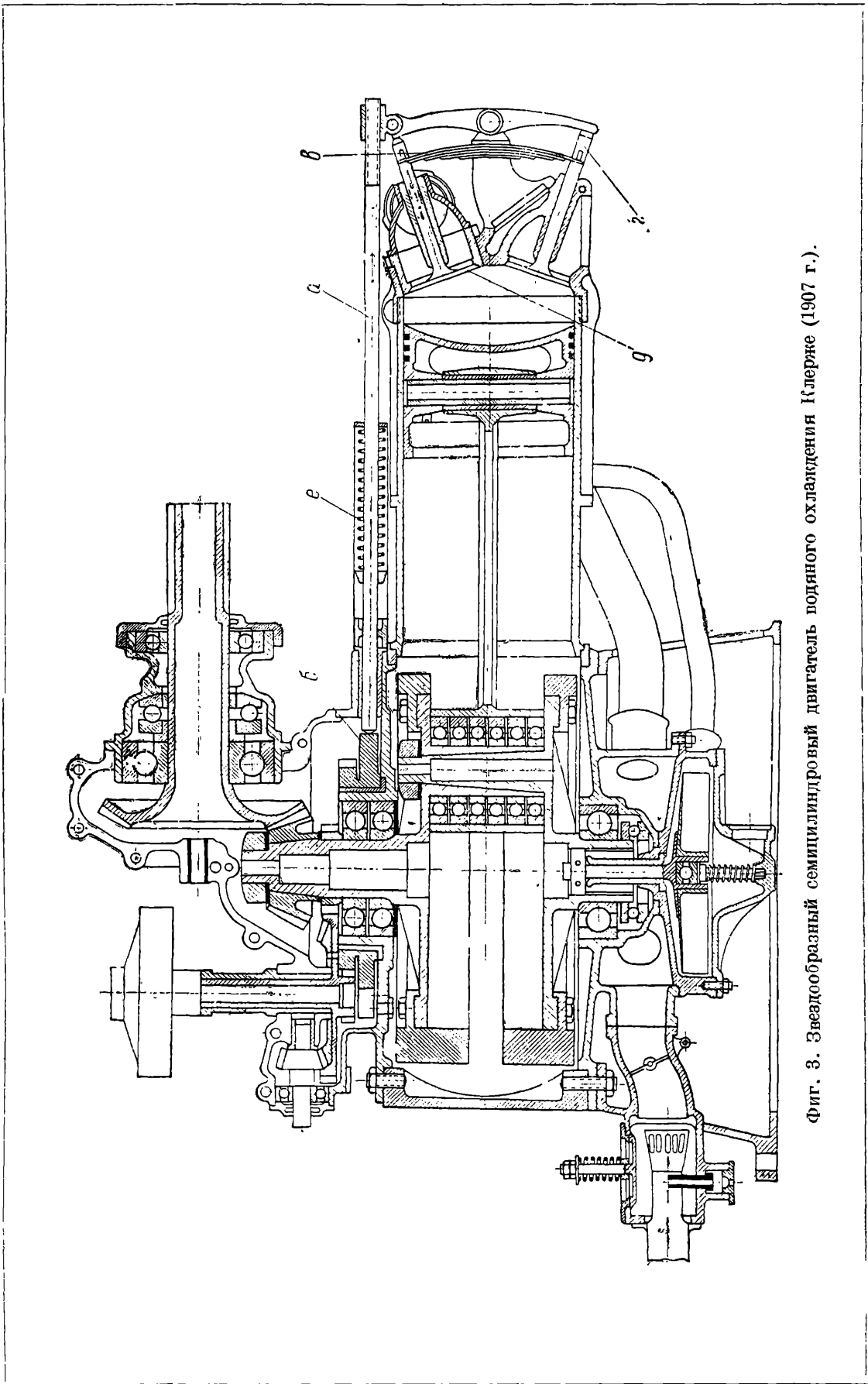
Строителей первых авиационных двигателей, естественно, привлекала возможность использовать мощный встречный поток воздуха для непосредственного охлаждения двигателя. Для таких двигателей само собой напрашивалось звездообразное расположение цилиндров. Французский инженер и пионер



Фиг. 2. Семицилиндровый веерообразный двигатель воздушного охлаждения REP (190 г.).

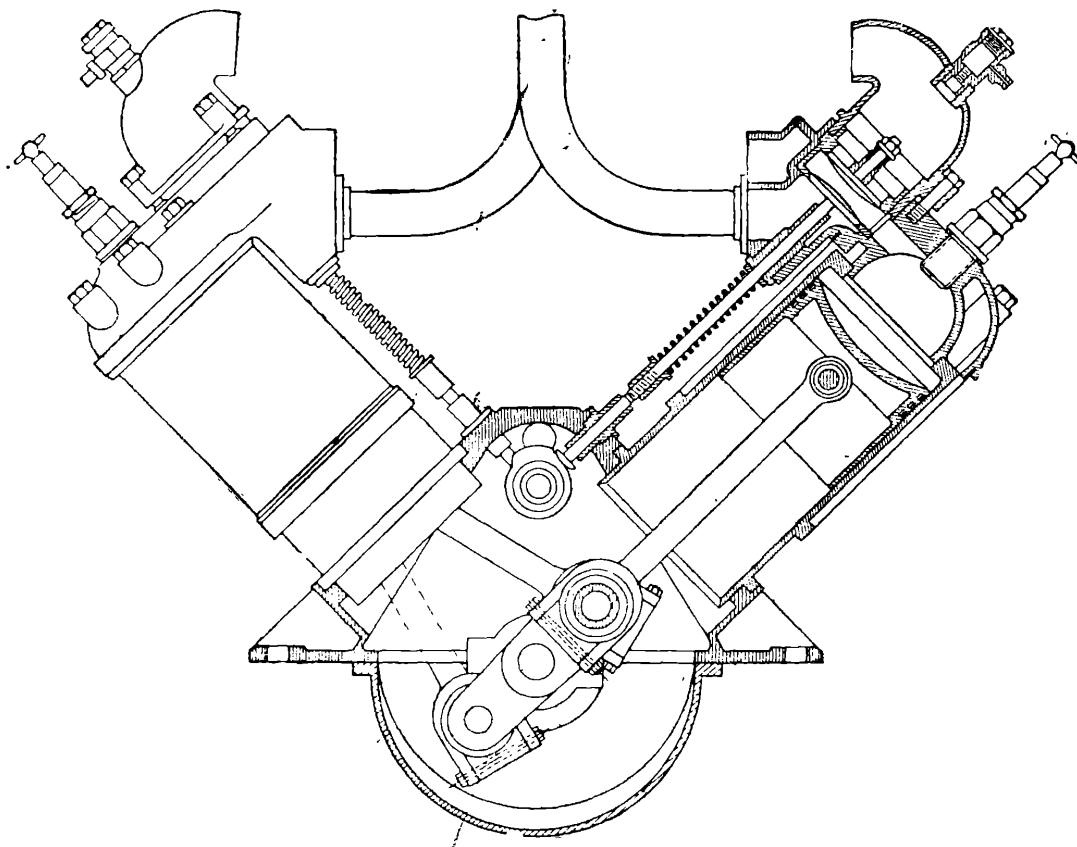
авиации Роберт Эно Пельтри обстоятельно разработал теорию звездообразного мотора, проанализировав условия уравновешенности, работу подшипников, порядок зажигания, распределение кулачковой шайбой и т. д. Расчетные формулы Пельтри до наших дней применяются при проектировании звездообразных моторов. Опасаясь, однако, заливания маслом нижних цилиндров, Пельтри построил не звездообразный мотор, а двухрядный веерообразный мотор, повернув нижние цилиндры пятицилиндровой звезды на  $180^\circ$ , заставив их работать на второй кривошип коленчатого вала (фиг. 1). Несмотря на большие надежды, возлагавшиеся на мотор REP, как был назван двигатель Пельтри (по инициалам его автора), охлаждение его было недостаточным, и двигатель быстро перегревался. Другим недостатком двигателя было исключительно сложное устройство двойного клапана. Впоследствии Пельтри спроектировал семицилиндровый веерообразный мотор (фиг. 2). Этот двигатель оказался еще менее удачным, чем первый.

Преимущества звездообразного двигателя — легкость конструкции, обусловленная хорошим использованием картера и коленчатого вала, вызвали попытки применения звездообразной схемы к двигателям жидкостного охлаждения. На фиг. 3 изображен семицилиндровый двигатель Клерже водяного



Фиг. 3. Звездообразный семицилиндровый двигатель водяного охлаждения Клерне (1907 г.).

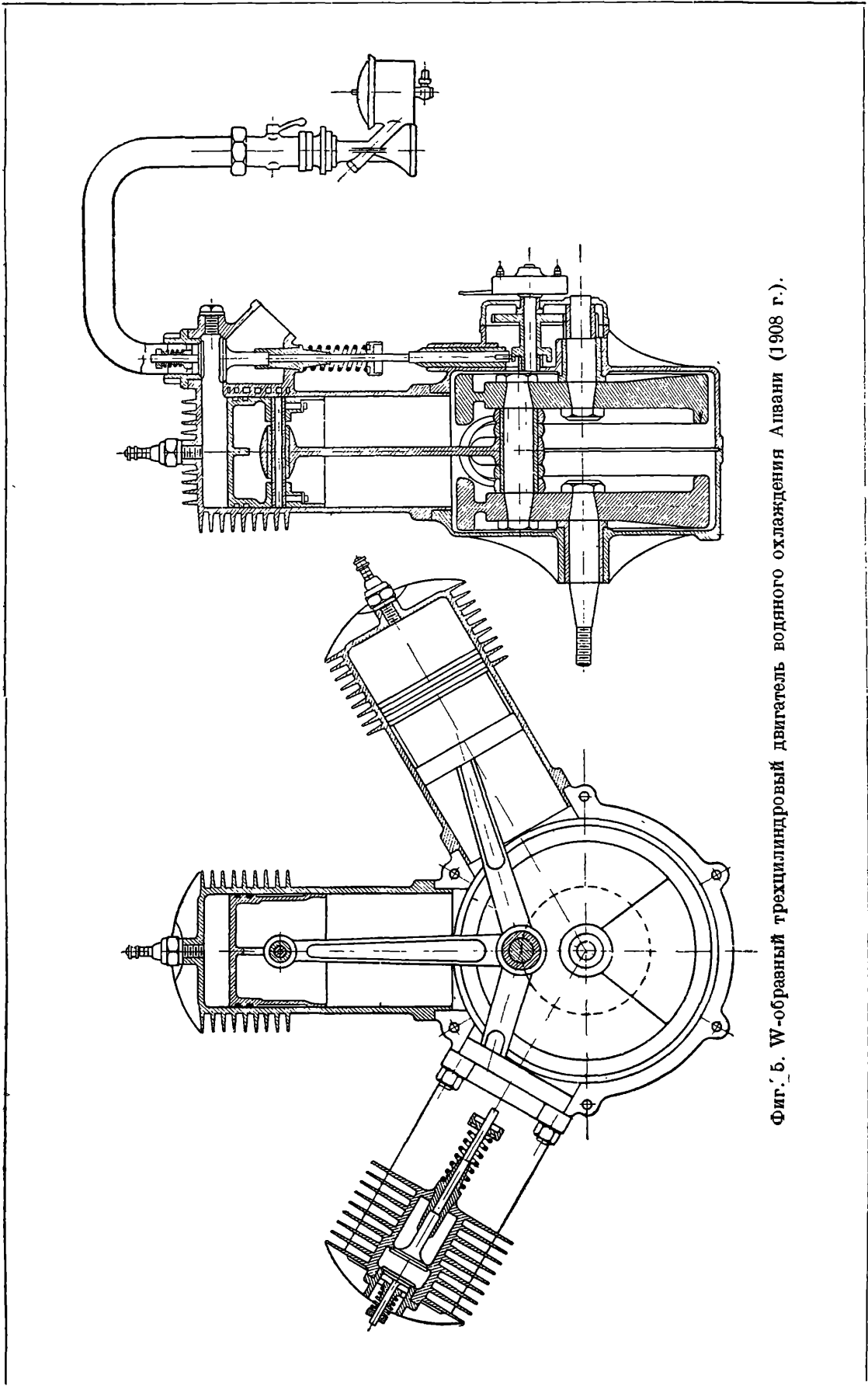
охлаждения мощностью 50 л. с., построенный заводом Клеман Баяр и установленный на самолете Виктора Татэна. Он отличается горизонтальным расположением цилиндров. Вращение передается воздушному винту через пару конических шестерен с передачей 0,66. Цилиндры этого двигателя стальные, сварные, с приваренной рубашкой из листовой меди. Клапаны управляются одним коромыслом и тягой *a* (фиг. 3), на которую непосредственно действует кулачок распределительной шайбы *б*. Закрытие клапанов обеспечивается листовой рессорой *в*. Выхлопной клапан *г* открывается прямым действием кулачка и тяги; всасывающий клапан *д* открывается действием возвратной пружины *е*, преодолевающей силу рессоры *в*. Разъемный коленчатый вал снабжен двумя маховиками с противовесами. Питание горючим из карбюратора.



Фиг. 4. Двигатель водяного охлаждения «Антуанет» (1905 г.).

В связи с развитием автомобилизма быстро шло усовершенствование автомобильных моторов и снижение их веса. Так, удельный вес автомобильного двигателя в 1900 г. составлял 33 кг/л. с., в 1903 г. эта цифра понизилась до 16 кг/л. с., в 1904 г. — до 8 кг/л. с., а в 1905 г. до 4 кг/л. с. В 1905 г. Левассер во Франции построил V-образный двигатель водяного охлаждения «Антуанет» для гоночных лодок, удельный вес которого был доведен до 2 кг/л. с. Этот двигатель немедленно был применен на самолетах и дал сильнейший толчок развитию авиации.

Двигатель «Антуанет» изображен на фиг. 4. Цилиндры отлиты из чугуна с рубашками из листовой латуни. Цилиндры одного ряда смещены по отношению к цилиндрам другого ряда с той целью, чтобы расположить кривошипные головки парных шатунов на одной шейке рядом друг с другом. Головки цилиндров, отлитые из алюминиевого сплава, притянуты к цилиндрам болтами. Камера сгорания имеет полусферическую форму; в центре камеры расположена свеча. Клапаны вынесены в сторону и расположены в особой коробке. Впускные клапаны автоматические, выхлопные управляются принуди-

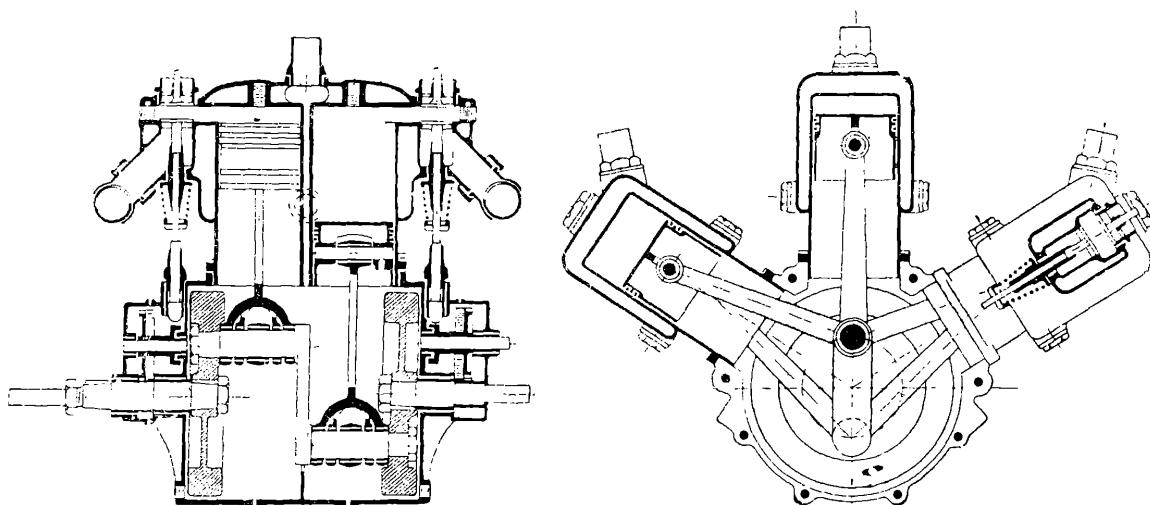


Фиг. 5. W-образный трехцилиндровый двигатель водяного охлаждения Алвани (1908 г.).

тельно. Поршни чугунные с вогнутым днищем, с тремя газовыми кольцами каждый. Питание двигателя осуществляется непосредственным впрыском бензина в цилиндры; количество впрыскиваемого бензина регулируется изменением хода поршня нагнетательного насоса.

В последующих модификациях мотора наряду с некоторыми конструктивными изменениями, например изготовлением цилиндра из ковanej стали, было применено испарительное охлаждение с конденсацией пара в особом холодильнике и возвратом конденсата в охлаждающую систему мотора специальной помпой.

Двигатели «Антуанет» мощностью 25—60 л. с. были установлены почти на всех первых французских самолетах: Фербера (1906 г.), Вуазена (1907 г.), Блерио (1907 г.) и др. Мотор «Антуанет» оставался одним из самых популярных авиационных моторов вплоть до 1910 г., несмотря на то, что отсутствие карбюратора делало его исключительно капризным (особенно при запуске) и надежность его заставляла желать многого лучшего.



Фиг. 6. W-образный шестицилиндровый двигатель водяного охлаждения Анзани (1911 г.).

В 1908 г. во Франции Анзани выпустил гоночный мотоцикл с трехцилиндровым карбюраторным мотором воздушного охлаждения мощностью 25 л. с. и весом 65 кг (фиг. 5). С этим мотором Блерио в 1909 г. совершил свой исторический перелет через Ламанш. Двигатель Анзани имел три цилиндра, расположенных под углом 60° друг к другу, составной коленчатый вал с маховиками и противовесами. Кривошипные головки шатунов работают по шейке коленчатого вала порознь. Головки шатунов вильчатые. Впускные клапаны автоматические, выхлопные управляются при помощи трех отдельных кулачковых валиков. Зажигание от аккумуляторов.

Мотор Анзани послужил прототипом целой серии веерообразных и звездообразных авиационных моторов воздушного охлаждения, пользовавшихся широким распространением вплоть до мировой войны. На фиг. 6 изображен шестицилиндровый W-образный двигатель Анзани водяного охлаждения позднейшей постройки.

Преимущества моторов воздушного охлаждения — малый вес моторной установки, простота обслуживания и др. — были ясны с первых шагов авиации. Но малая скорость первых самолетов делала воздушное охлаждение ненадежным. Курьезный, но показательный факт: Блерио смог закончить свой перелет через Ламанш только потому, что его в пути застиг дождь, помогший охлаждению перегревшихся цилиндров мотора.

В десятых годах внимание конструкторов сосредоточилось на задаче осуществления вполне надежного воздушного охлаждения. Пробовали решить