

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЗВУКА НА ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ

П. Грегуси

Рассматриваются результаты опытов по интенсификации горения жидкого топлива путем использования акустического горелочного насадка, осуществляющего одновременно с распылением топлива генерацию звука.

В настоящее время существует мало сведений относительно влияния акустических явлений на процессы горения; те данные, которые имеются, относятся исключительно к газовым пламенам [1]. Насколько нам известно, до сих пор не было проведено опытов по изучению влияния звука на пламя, возникающее при горении жидких топлив.

Настоятельная потребность в увеличении интенсивности горения в различного рода новых устройствах придает важность проблеме воздействия звуком на процессы горения. Однако, несмотря на многочисленные исследования и разработки в области использования интенсивного звука, вводимого в камеру сгорания для стабилизации пламени или для изменения скорости сгорания топлива, механизм воздействия звука на процессы горения до сих пор не вполне ясен.

Поведение пламени в газовых светильниках при воздействии звукового поля было исследовано в 1953 г. Шомхеди и Тарноци [2]. Они применяли свисток Гартмана [3] в частотном диапазоне 6—19 кГц и достигали интенсивности в 150 дБ.

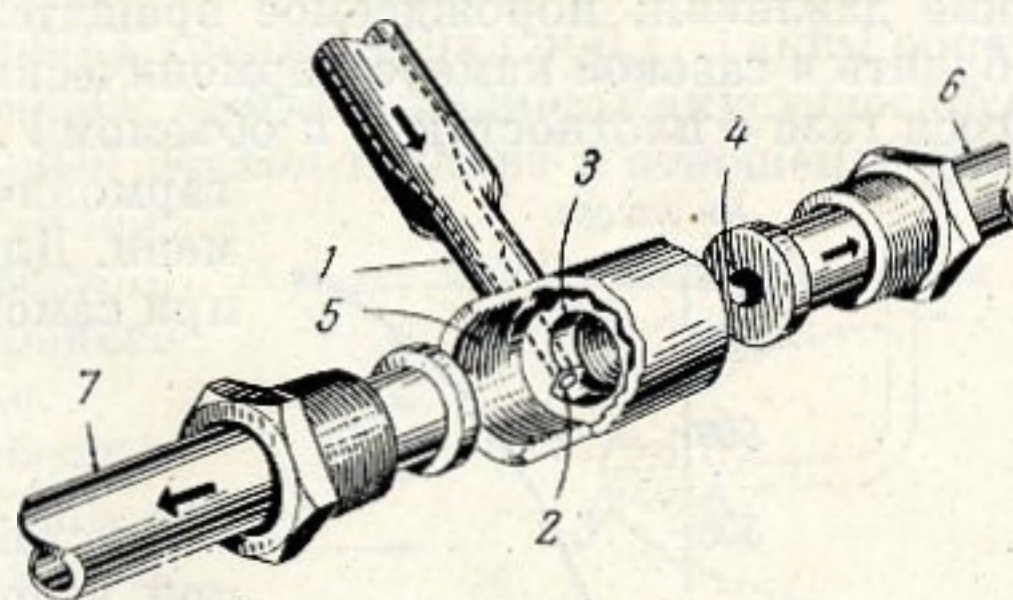
Наблюдение пламени через стеклянную стенку показало, что форма пламени в звуковом поле получается укороченной и расширенной, причем поверхность пламени учетверялась.

Авторы пытались привести это явление в согласие с механизмом проникновения акустической энергии в пламя. По их мнению, лишь небольшая часть акустической энергии может проникнуть в пламя; это дает нам основание считать, что более целесообразно генерировать звуковую энергию непосредственно в горючей смеси.

В 1959 г. мы попытались увеличить эффективность пламенной плавильной печи с помощью звуковой энергии. Поскольку в промышленной установке такого рода должны были обрабатываться большие количества материалов, можно было использовать только генераторы звука, основанные на аэро- или гидродинамических принципах. Классический генератор Гартмана [3] для данных целей непригоден, с одной стороны по причине малого коэффициента полезного действия, а с другой стороны, потому, что в нем полость резонатора противостоит газовому потоку. Поэтому мы попытались модифицировать жидкостный свисток, разработанный нами в 1954 г. [4].

Отправной точкой для нас послужили исследования Ранка [5], который в 1933 г. показал, что газ, если он введен в виде вихря из трубы под давлением и при постоянной температуре, как это показано на фиг. 1 (1 — труба, подводящая газ при высоком давлении, 2 — входное отверстие, 3 — металлическая улитка, придающая струе вихревой характер, 4 — осевое отверстие для отвода охлажденного газа из центральной части вихря, 5 — периферическое отверстие для отвода нагретого газа из внешней части вихря (скрыто фланцем), 6 — труба холодного газа, 7 — труба горячего

газа), может быть подразделен на две струи более низкого давления таким образом, что образуется большая разница в температурах этих струй. Это явление было позднее, во время войны, исследовано Хилшем [6], но никто не заинтересовался акустическими явлениями, сопровождающими эти процессы. В то время, когда мы занимались упомянутыми выше исследованиями, Воннегут [7] описал источник звука, которому он не придавал практического значения. Этот источник действовал по существу на том же принципе, что и труба Ранка. Однако Воннегут не обратил внимания на температурные эффекты, возможно потому, что он не был знаком с указанными выше публикациями.



Фиг. 1

Разработанный нами акустический горелочный насадок (АГН) создает звуковую энергию и при использовании принципа циклона. Мы попытались собрать все сведения относительно циклонных пламен, вращающихся стабилизаторов пламени и тому подобное и обнаружили, что никто не интересовался акустическими явлениями, сопровождающими эти процессы. Это особенно бросается в глаза в статье [8], описывающей систему, в которой разбрызгивающий элемент горелки представляет собою вихревую камеру, имеющую, на первый взгляд, форму, подобную той, которую имеет наш акустический горелочный насадок.

Мы могли заключить из указанной работы, что в такой системе сжигания может развиваться большая акустическая энергия, поскольку падение давления вдоль оси камеры может характеризоваться квадратичной зависимостью, а не кубичной, как в АГН.

Разрабатывая АГН, мы полагали, что газ, вводимый тангенциально под давлением в вихревую камеру, создает за счет вращательного движения потока газа падение давления, которое можно приближенно описать следующим полиномом:

$$p_x = p_0 + S_1x - \frac{4}{3} S_2x^3, \quad (1)$$

так же, как это делал Теодорчик в одной из своих работ [9], где рассматривались, между прочим, колебания гейзера. Разница состоит только в том, что при колебаниях гейзера причиной движения является разность температур, в то время как в нашем случае вместо температурных разностей мы имеем разность давлений. Соответственно сказанному, генератор можно рассматривать как резонатор, в котором объем газа V с плотностью ρ движется вдоль участка, на котором имеет место падение давления. Если мы предположим, что среднее давление в объеме газа при равновесии равно p_0 , и что мгновенное значение давления при колебаниях равно $p_0 + p$, то для избыточного давления p мы получим уравнение

$$K \left(S_1x - \frac{4}{3} S_2x^3 - p \right) = V\rho\beta \cdot p. \quad (2)$$

Принимая во внимание потери за счет трения η , мы получаем основное дифференциальное уравнение

$$\ddot{x} + 2\delta\dot{x}\omega_0^2 + \eta p = 0. \quad (3)$$

Используя метод Теодорчика, можно показать, что система уравнений (2) и (3) имеет решение, которое соответствует приближенно чистогар-

моническим колебаниям

$$x = A \sin \omega t. \quad (4)$$

Более детальное изложение решения этой задачи можно найти в работе [10]. Здесь мы скажем только, что эти уравнения показывают, как падение давления, порождаемое вращательным движением газа, может возбудить в газовой камере гармонические колебания. Давление колеблющегося газа с плотностью ρ и объемом V , т. е. с массой m , также изменяется

гармонически, но с запаздыванием τ во времени. Для амплитуды устойчивых колебаний при самовозбуждении получается выражение

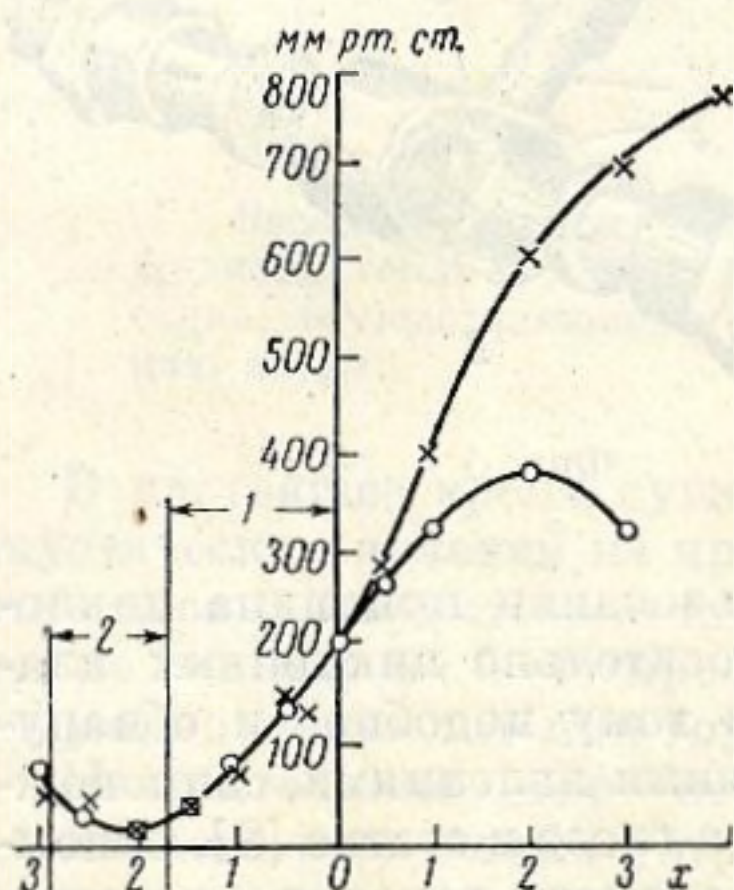
$$A = V \sqrt{\frac{\eta p_0 S_1 \sin \omega \tau - 2\delta \omega}{S_2 p_0 \eta \sin \omega \tau}}, \quad (5)$$

т. е. устойчивые колебания будут иметь место при условии

$$\eta S_1 p_0 > 2\delta \omega \quad (6)$$

или, иначе говоря, наилучшие условия для самовозбуждения будут иметь место при временном сдвиге, удовлетворяющем соотношению

$$\tau = \frac{T}{4}; \quad \frac{5}{4} T. \quad (7)$$

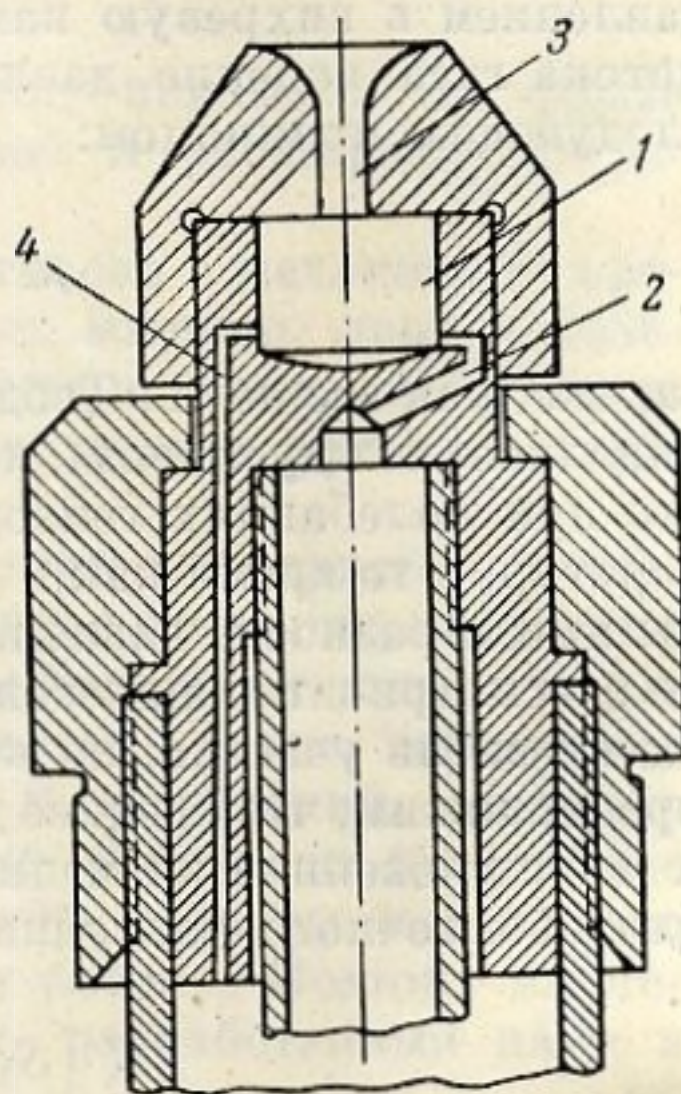


Фиг. 2

Фиг. 2 показывает, что расчетные (крестики) и экспериментальные (кружочки) значения падения давления в одном из типов нашего насадка находятся в хорошем согласии. (На фигуре 1 — область изменения координаты x , отвечающая выходной трубе, 2 — то же для полости.) Это согласие все более и более ухудшается по мере удаления от выходной трубы. Тем не менее, это явление вполне понятно, так как высказанные выше соображения справедливы только для замкнутой системы генератора и характер падения давления становится иным в камере сгорания, которая может в первом приближении рассматриваться как практически неограниченное пространство.

Наконец, нужно отметить, что фактор затухания всегда положителен и, таким образом, акустический горелочный насадок представляет собой устойчивую автоколебательную систему.

Как было упомянуто выше, Воннегут не придал никакого практического значения описанному им источнику звука. Однако, анализируя исследования Ранка, Хилша и Воннегута, мы можем найти соотношение между диаметром трубы и ее длиной, при котором акустический генератор достаточно эффективен с точки зрения промышленных применений. Как мы показали в одной из наших предыдущих работ, в которой рассматривался «гидрокенонный» свисток, важно соотношение между следующими размерами (фиг. 3): радиусом R большей полости 1, радиусом r_0 входного отверстия 2 [2, 4], радиусом r_k выходного отверстия 3 [5] и так называемым «радиусом ядра» r_m . Под последним мы подразумеваем радиус пространства, где всасывающий эффект, порождаемый вращательным движением, больше не сказывается.



Фиг. 3

Это соотношение имеет вид

$$R = \frac{r_0^2 r_m}{r_k^2 z} + r_0, \quad (8)$$

где z — константа, зависящая от коэффициента трения и кинематической вязкости, и имеющая для легких жидких топлив порядок 0,1. Таким образом, с помощью уравнения (8) мы можем выбрать размеры акустического горелочного насадка, так как желаемый расход топлива и отношение давлений определяют радиус входного отверстия r_0 , и согласно нашим исследованиям разность $r_k - r_m$ имеет для широкого класса топлив значение $\sim 7 \cdot 10^{-2}$ см.

Было обнаружено, что при работе с акустическим горелочным насадком может быть получена очень хорошая стабильность горения без использования стабилизаторов в форме плохо обтекаемого тела или стабилизаторов со встречной струей.

Нельзя сомневаться в том, что вращательное движение пламени само по себе дает стабилизирующий эффект [11]; однако, мы твердо убеждены, что акустическая энергия, генерируемая по нашему методу, дополнительно повышает стабильность горения.

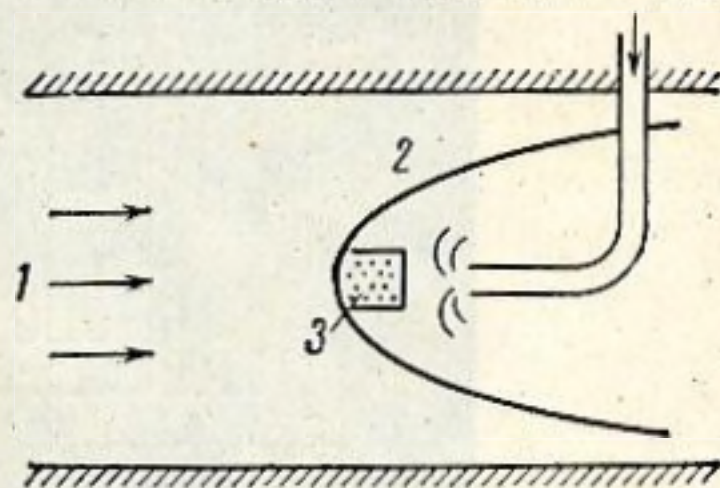
Как указано Кэмпбелом, стабилизация пламени может быть достигнута при использовании газовых струй. Шеффер и Кэмпбел [12] предложили упрощенную модель механизма стабилизации, показанную на фиг. 4 (1 — поток, 2 — фронт пламени, 3 — задающий реактор). Они предполагают, что существует некоторая критическая зона, которую они определяют как небольшой задающий реактор, от которого распространяется пламя. Кроме того, они предполагают, что условия в этой зоне определяют поведение пламени.

Зная механизм работы акустического горелочного насадка, мы полагаем, что вследствие падения давления, порождаемого вращательным движением газового потока, может развиваться стационарный газовый поток, который действует так же, как встречный поток газа. (Возможно, упомянутый выше стабилизирующий эффект в циклонных пламенах имеет ту же причину).

Полагая, что на этот газовый поток наложены периодические колебания, мы видим, что критическая зона, или задающий реактор, должна так же совершать колебания с частотой и фазой, определяемой акустическим горелочным насадком. Однако АГН в то же время является вихревым распылителем, так что акустическая энергия воздействует на капельки топлива. Миссе [13], который исследовал влияние мощных источников звука на жидкие струи, установил, что скорость, с которой горючий газ освобождается на фронте горения*, изменяется периодически с частотой источника звука.

Постулируя, что увеличение угловой скорости вращения газа приводит одновременно к увеличению скорости сгорания и давления в камере, Миссе заключил, что слабые импульсы давления должны возникать всякий раз, как одна из капелек топлива достигает фронта горения. Нестабильность будет возникать в тех случаях, когда эти импульсы давления будут совпадать по времени с максимумами колебательного давления в камере, т. е. при наличии синфазности между скоростью горения и давлением.

Случай Миссе предполагает, что фронт горения находится на постоянном расстоянии от форсунки, несмотря на наличие интенсивного звукового

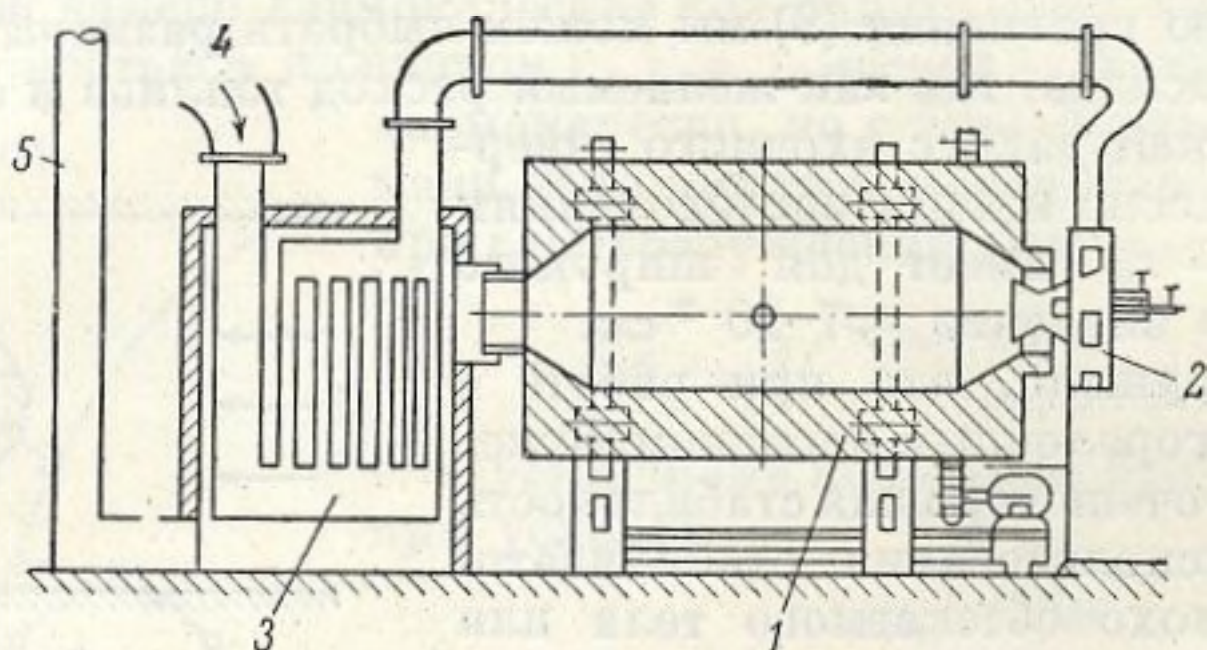


Фиг. 4

* Предполагается, что это освобождение имеет место на постоянном расстоянии от форсунки.

поля. Применяя акустический горелочный насадок, мы добиваемся того, что фронт горения и критическая зона, как упоминалось выше, колеблются с частотой и фазой, определяемой насадком. Этот факт имеет важные следствия.

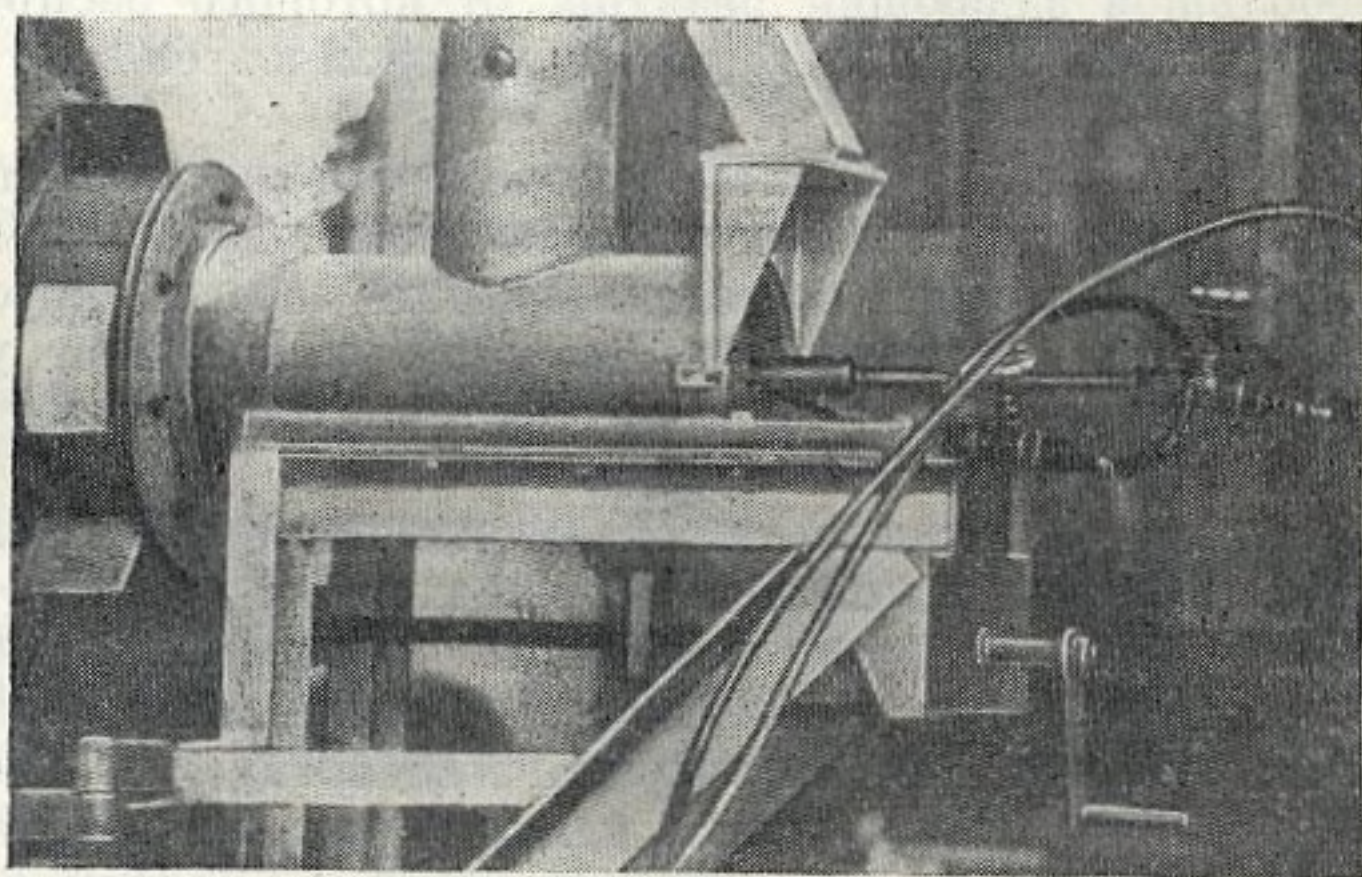
Мы указывали, что акустический горелочный насадок является стабильной автоколебательной системой; поэтому колебания критической зоны



Фиг. 5

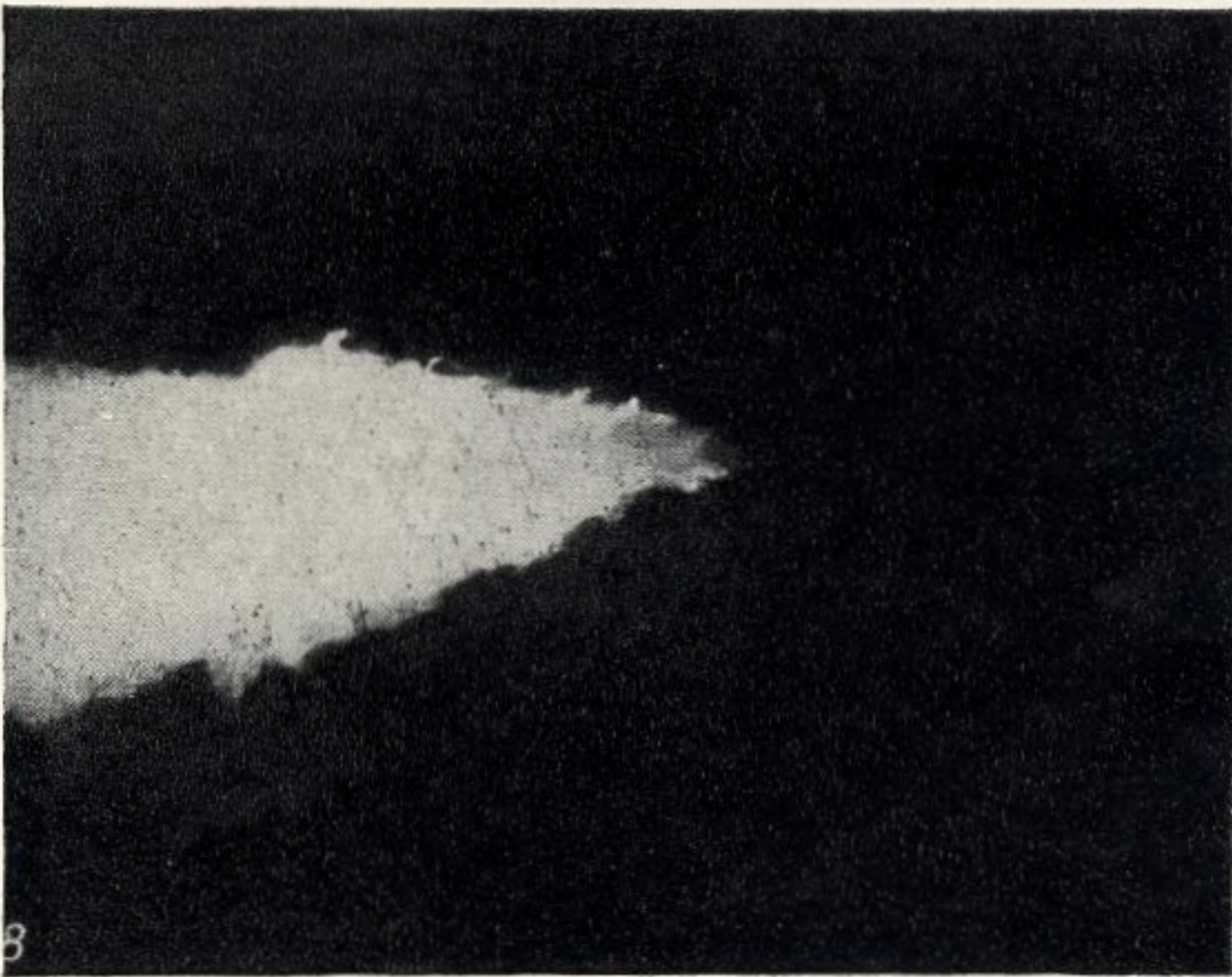
следуют тем же закономерностям. Таким образом, если в системе «работающий насадок — камера сгорания» в камере действует переменное давление, нестабильность никогда не может возникнуть, так как в этом случае будет иметь место асинхронное действие, которое было открыто Папалекси.

Поскольку данный генератор создает звук на циклонном принципе, мы считали, что целесообразно объединить его с так называемым «вихревым распылителем», который обладает большой распыляющей способностью.

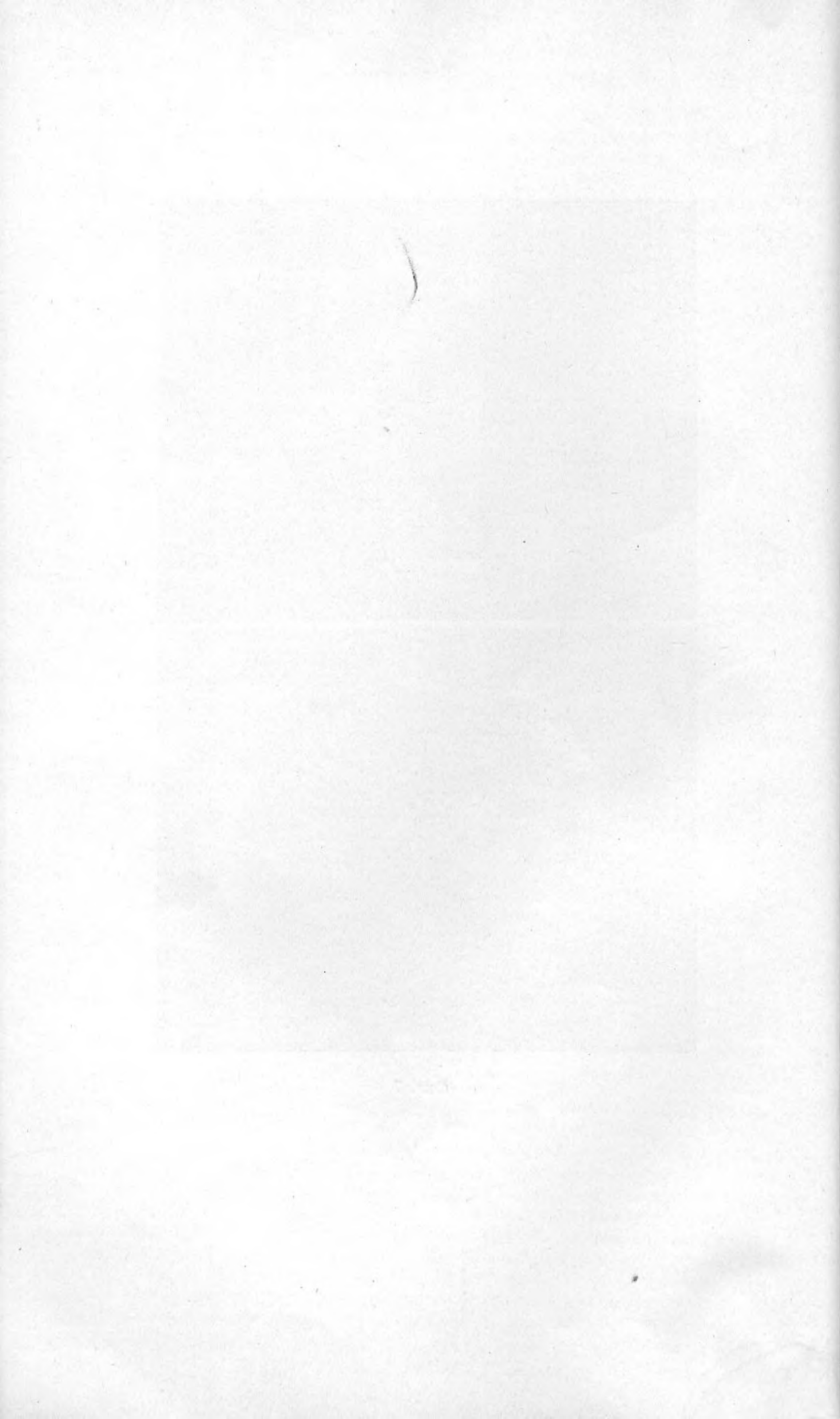


Фиг. 6

Как это было показано Тейлором [14] распыление жидких струй в распылителях данного типа определяется не турбулентным движением частиц топлива в жидкой струе, но скорее утоньшением жидкого слоя и взаимодействием между струей и воздухом. Это взаимодействие может быть усилено при колебаниях потока воздуха с относительно большой амплитудой. Так как в такого рода распылителях всегда образуется воздушное ядро, мы попытались привести это ядро в интенсивные акустические колебания. Поэтому не удивительно, что проявились благоприятные акустико-химические явления. Акустическая энергия, полученная нами описанным способом, одновременно увеличила распыление топлива вихревым распылителем, как это и ожидалось, и, таким образом, создались лучшие условия для процесса сгорания.



Фиг. 7



Акустический горелочный насадок, сконструированный на описанных выше принципах, был испытан на нефтяной вращающейся печи литейно-механического завода в Будапеште. Схема устройства приведена на фиг. 5 (1 — печь, 2 — акустическая горелка, 3 — рекуператор, 4 — подвод воздуха, 5 — дымовая труба). Установка горелки на печи показана на фиг. 6. На фиг. 7 показано пламя, создаваемое вихревым распылителем, на фиг. 8 — то же пламя при воздействии звука с частотой 4 кгц при 150 об. Площадь пламени увеличилась, как и в опытах Шомхеда и Тарноци; пламя совершает вращательное движение, что, согласно литературным данным, благоприятно для процесса сгорания.

Испытания показали, что при использовании АГН акустическая энергия настолько увеличивает тепловую отдачу, что необходимая температура плавления была достигнута за 40—50 мин (вместо 1 часа). Было также установлено, что расход топлива уменьшается на 10%. В дополнение металлурги нашли, что отливки, полученные данным методом, имели значительно лучшую структуру и были более пригодны для термообработки.

Эти результаты, вероятно, обязаны своим происхождением следующим эффектам:

1. Степень распыления под влиянием акустической энергии увеличивается.

2. Стабильность границы фронта горения увеличивает полноту сгорания капель топлива.

3. Так как энергия вводилась в самое пламя, а не извне, в большей степени могут проявляться благоприятные химико-акустические явления.

4. Вероятность столкновения капелек топлива и окисляющих молекул увеличивается благодаря воздействию акустической энергии; поэтому стехиометрическое соотношение может быть лучше соблюдено.

5. Поскольку акустический горелочный насадок основан на принципе трубы Ранка, в газовом потоке могли обнаруживаться температурные различия; оболочка вращающегося пламени имеет гораздо более однородное распределение температуры, что обеспечивает более однородный коэффициент диффузии.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. Bergman. Der Ultraschall. Nachtrag zum Literaturverzeichnis der 1954 erschienenen 6 Aufl. S. Hirzel Verlag Stuttgart, 1957.
2. T. Tarnóczy. K. Somhegyi. Egési folyamatok befolyasolasa akusztikus energiaval. Fiz. Szemle III, 1953, 6.
3. L. Hartmann. On the production of acoustic waves by means of an air-jet of a velocity exceeding that of sound. Philosop. Mag. and J. Sc., 1931, 11, 7 ser., January — June, 926—948.
4. P. Greguss. Akusztikus energiát előállító eljárás és berendezés. 1955 Március 29. Hung. Pat. 144, 122.
5. M. G. Ranque. Experiences sur la détente geratoire avec productions simultanees d'un echappement d'air chaud et d'un echappement d'air fluid. J. Phys. Rad., 1933, 4, 6, 112—115.
6. R. Hilsch. The use of the expansion of gases in a centrifugal field as cooling process. Rev. Sci. Instr., 1947, 18, 2, 108—113.
7. B. Vonnegut. A vortex whistle. J. Acoust. Soc. America, 1954, 26, 1, 18—20.
8. Dowty Spill Burner Fuel System. Aircraft Eng., 1953, 25, 291, 133.
9. К. Ф. Теодорчик. Автоколебательные системы. М.—Л., ГИТТЛ, 1952, 172—174.
10. P. Greguss. Scientific work at the Polish Academy of Science, 1957.
11. L. F. Albright, L. G. Alexander. Stable cyclonic flames of natural gas and air. J. Prop., 1956, 26, 10, p. 1, 867—873.
12. A. Schaffer, Ali Bulent Cambel. The effect on an opposing jet on flame stability. Jet Prop, 1955, 25, 6, 284—287; Continued investigations of the opposing jet flameholder. 1956, 26, 7, 1, 576—578.
13. C. C. Miesse. Flame front stability in liquid fuel droplet combustion. Ind. Eng. Chem., 1955, 47, June, 1180.
14. E. Taylor. Proc. 7th Int. Congr. Appl. Mech., 1948.