

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ ТЕМПЕРАТУР
В ДВУХФАЗНОМ ПЕРЕГРЕТОМ СЛОЕ ПРИ КИПЕНИИ
ЖИДКОСТИ

Н. Афган

(Белград)

Одним из основных параметров, определяющих интенсивность теплообмена на границе раздела жидкой и паровой фаз, является перегрев жидкости при кипении. В двухфазном пограничном слое перегрев представляет собой переменную (флуктуирующую) величину, зависящую от нескольких параметров системы и имеющую статистический характер. Исследование статистического характера флуктуаций перегрева жидкости является темой данной работы.

Исходя из экспериментальных данных по измерению температурных флуктуаций в двухфазном пограничном слое при кипении воды, контактирующей с горизонтальной обогреваемой поверхностью, проведен статистический анализ амплитуды флуктуаций. На основе этого анализа определен средний и максимальный перегрев в зависимости от расстояния до нагреваемой стенки.

Для определения микроструктуры флуктуаций температур и исследования их происхождения проведена скоростная киносъемка головки термопары, контактирующей с двухфазной средой. Установлено, что наличие разных по величине амплитуд в основном связано с двумя эффектами — существованием перегретого слоя на пузыре в течение его роста и конвекцией жидкости вблизи пузыря.

1. Описание проблемы. Известно, что величина перегрева жидкости при кипении определяет интенсивность процесса образования паровой фазы на границе раздела жидкость — пар. Исследование перегрева жидкой фазы по отношению к температуре кипения представляет интерес в связи с изучением механизма процесса кипения. Характер перегрева при образовании паровой фазы в присутствии поверхности нагрева отличается от перегрева жидкости при гомогенном парообразовании [1-3]. Это отличие заключается прежде всего в статистическом характере перегрева. В случае гомогенного парообразования перегрев связан с флуктуациями параметров состояния в микросистеме; при кипении у поверхности нагрева кроме этих флуктуаций существуют и флуктуации, вызванные турбулентностью жидкости вследствие образования паровых пузырьков на поверхности нагрева. Флуктуации температуры в двухфазном пограничном слое при кипении жидкости исследовались в [4-6]. Из этих работ видно, что характер флуктуаций температуры зависит от физико-химических свойств жидкости, теплового потока на поверхности нагрева, качества и вида поверхности.

Проведенные ранее исследования флуктуаций температуры в двухфазном пограничном слое [7-10] показали, что флуктуации перегрева при кипении жидкостей имеют статистический характер с полностью определенными статистическими параметрами. Амплитудным и гармоническим анализом флуктуаций температуры в различных точках пограничного слоя было показано, что наиболее вероятный перегрев жидкости является функцией расстояния при постоянном тепловом потоке на обогреваемой поверхности. В этих работах показано также, что максимальный перегрев может быть значительно больше среднего перегрева. Данная работа посвящена дальнейшему исследованию природы флуктуаций, их отдельных реализаций и статистического характера флуктуаций в различных режимах кипения.

2. Анализ температурного поля вблизи парового пузырька при кипении на горизонтальной поверхности. Анализ флуктуаций температуры в двухфазном пограничном слое при кипении воды на горизонтальной поверхности базируется на экспериментальном измерении температурных флуктуаций на различных расстояниях от поверхности нагрева. В качестве датчика флуктуаций температуры была использована микротермопара хромель-алумель, сделанная из проволок диаметром 12.5 мк. Динамическая чувствительность термопары определялась специально разработанным методом, описанным в [10]. Сущность этого метода в следующем: световой пучок направлялся на головку термопары, за которой был установлен фотодиод. Переизлучением светового пучка с определенной частотой осуществлялся периодический нагрев и охлаждение головки термоэлемента. Измерением электродвижущей силы термоэлемента с одновременной регистрацией интенсивности светового пучка, падающего на фотодиод, и сравнением полученных сигналов, определялась частотная характеристика термопары.

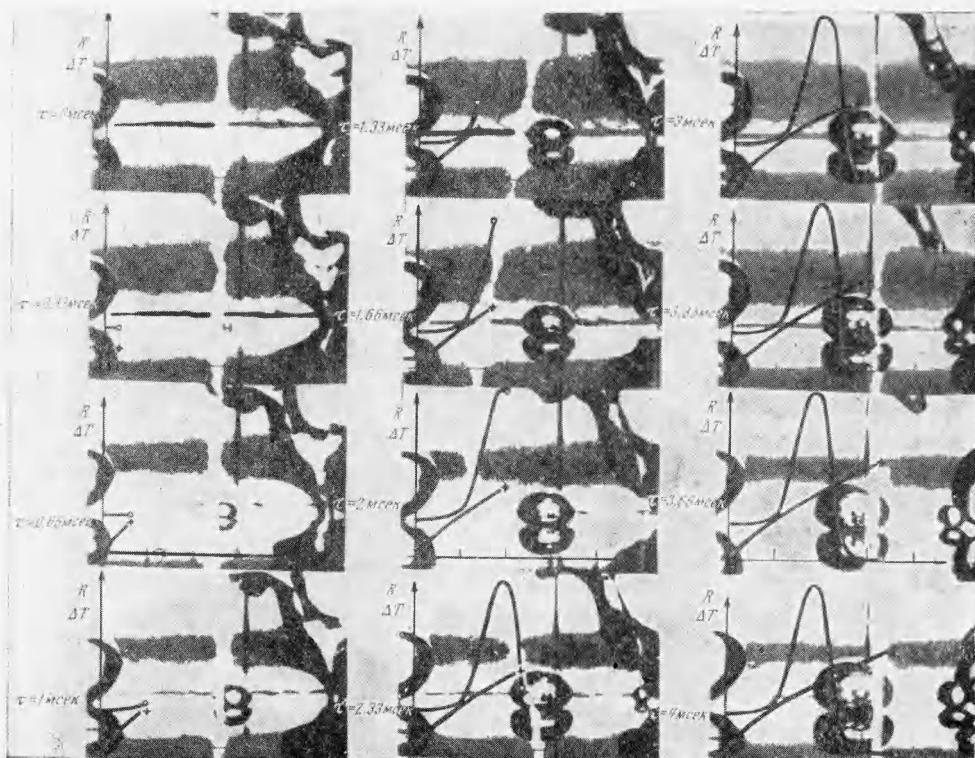
Измерение флуктуаций температуры при кипении проводилось на следующей экспериментальной установке [10]. Полированная поверхность экспериментального сосуда величиной 6 см² представляла собой поверхность нагрева. Тепло подавалось на поверхность нагрева через медный стержень, припаянный к наружной горизонтальной стороне экспериментального сосуда. Тепловой поток на поверхности нагрева определялся с помощью пяти термопар, расположенных вдоль медного стержня. Экстраполяцией показаний этих термопар до поверхности нагрева определялась температура стенки. Микротермопара была установлена на крышке экспериментального сосуда с возможностью ее передвижения в горизонтальной плоскости. Вертикальное передвижение термозонда осуществлялось микротермическим винтом, который позволял с достаточной точностью определить положение головки термопары по отношению к поверхности нагрева. Электродвижущая сила термопары компенсировалась электродвижущей силой, соответствующей температуре кипения, и полученная разность подавалась на усилитель. Сигнал, усиленный в 1000 раз, подавался затем на осциллограф или на специальный магнитофон.

Взаимное положение термопары и пузырька во время его роста определялось скоростной киносъемкой. Для этого была использована кинокамера «Нуса» с двумя объективами. Один из них использовался для съемки взаимодействия двухфазного пограничного слоя с микротермопарой, другой был направлен на экран осциллографа, записывающего сигнал микротермопары. По полученным фильмам определялось температурное поле вокруг пузырька в течение его роста. На фиг. 1 приведены последовательные кадры из фильма, снятого при тепловом потоке $q = 17.5 \text{ вт/см}^2$ и расстоянии термопары от поверхности нагрева $\Delta x = 2.25 \text{ мм}$. Для режима, который характеризуется наличием отдельных зародышей и соответствует значению теплового потока $q = 8.65 \cdot 10^4 \text{ вт/м}^2$ и давлению $p = 1 \text{ атм}$, сделана серия киносъемок одного и того же центра парообразования с различными положениями термопары. На фиг. 2 приведены результаты этих измерений для двух различных типов пузырьков, характеризующихся одинаковой скоростью роста. Положение термопары соответствовало следующим расстояниям от поверхности нагрева: $\Delta x = 0.5 \text{ мм}$ — точки 1, 1.5 мм — точки 2, 2.5 мм — точки 3, 3.5 мм — точки 4, 5.5 мм — точки 5. Как видно из этих диаграмм, температурное поле вблизи пузырьков полностью повторяется, т. е. характер изменения для различных реализаций отдельных пузырьков одинаковый. Это позволяет сделать предположение, что и при различных положениях термопары характер изменения температурного поля вблизи пузырька остается одинаковым. Далее это пред-

положение дает возможность представить температурные гистограммы, на некоторых в качестве параметра фигурирует расстояние термопары от поверхности нагрева. Эти кривые описывают изменение температуры в пространственных координатах, где теперь в качестве параметра появляется время роста пузырька.

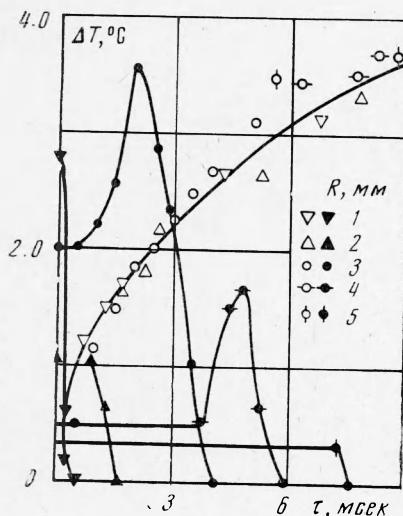
На фиг. 3 показано изменение температуры в зависимости от расстояния до поверхности нагрева при $\tau = 2, 3, 5$ мсек для двух различных типов пузырька. Из этих диаграмм видно, что вокруг пузырька существует тепловой пограничный слой. Известно также, что максимальная температура в тепловом пограничном слое существенно изменяется с течением времени в результате отвода тепла через поверхность раздела фаз и благодаря нестационарной теплопроводности в окружающую жидкость. Второй из процессов приводит к изменению толщины пограничного слоя. При оценке толщины пограничного слоя нужно учитывать, что результаты получены при измерении с неподвижным термометром, а термический пограничный слой двигался по отношению к термометру со скоростью роста пузырьков. Скорость движения жидкости вблизи пузырька можно определить на основании измерений скорости роста пузырька.

Из диаграммы на фиг. 3 видно, что толщина пограничного слоя $\delta = 0.5$ мм для $\tau = 2$ мсек. Скорость движения теплового пограничного слоя, вызванного ростом пузырька, для одного и того же времени $\tau = 2$ мсек составляет $W = 0.8$ м/сек. Это означает, что микротермопара проходит через пограничный слой за интервал времени $\tau = 0.63$ мсек, который близок к значению постоянной времени данной микротермопары. Из этого следует,

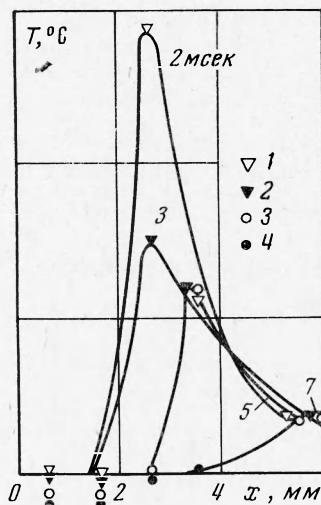


Фиг. 3

что использованный термоэлемент при таких скоростях движения пограничного слоя регистрировал только те изменения температур, которые имеют место в пограничном слое толщиной больше $\delta = 0.2 \text{ мм}$. Поэтому в измерениях не мог появиться тепловой пограничный слой на расстояниях меньше $\Delta x = 1.5 \text{ мм}$.



Фиг. 2



Фиг. 3

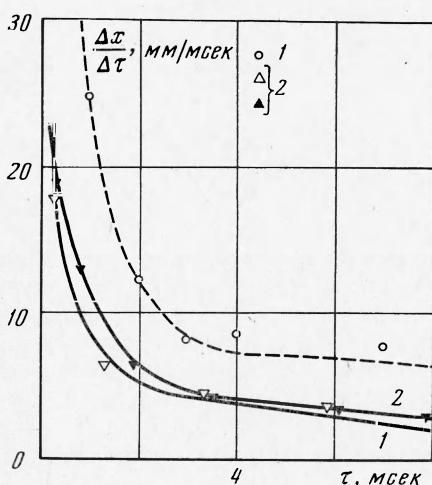
На основании измерений, показанных на фиг. 3, можно определить скорость движения максимума температуры в пограничном слое. На фиг. 4 дана зависимость скорости изменения этого максимума в функции времени роста. На фиг. 4 1 — скорость роста пузырька плюс скорость тепловой волны, а 2 — скорость $dR/d\tau$ пузырьков 1 и 2. Если из этой скорости вычесть скорость роста пузырька, получим скорость тепловой волны в нестационарном пограничном слое. Полученное значение скорости должно находиться в согласии с теориями роста пузырька, базирующими на предположении о существовании теплового пограничного слоя вокруг парового пузырька, контролирующего скорость и механизм роста пузырька.

При анализе температурного поля вокруг пузырька исходим из одномерного уравнения нестационарной теплопроводности

$$(2.1) \quad \partial T / \partial \tau = a \partial^2 T / \partial x^2$$

и следующих граничных и начальных условий:

$$(2.2) \quad \begin{aligned} T(x=0, \tau \leq 0) &= T_p \\ T(x \leq \delta, \tau \leq 0) &= T_p \end{aligned}$$



Фиг. 4

$$T(x > \delta, \tau \leq 0) = T_p$$

$$T(x = 0, \tau > 0) = T_S$$

$$T(x = \infty, \tau > 0) = T_S$$

Это дает возможность ввести импульсные функции первой степени вместо первых двух граничных и начальных условий и получить решение уравнения (2.1) в виде

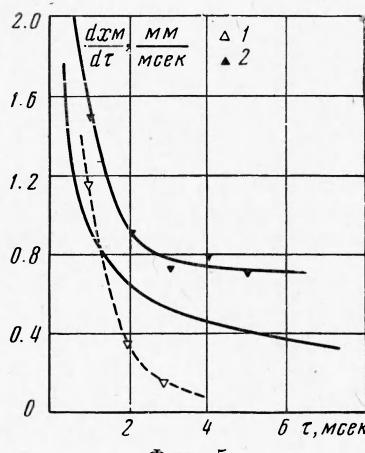
$$(2.3) \quad \frac{T(x, t) - T_S}{T_S} = \frac{\omega_2 x}{2(a\pi\tau^3)^{1/2}} e^{-x^2/4a\pi}$$

из которого далее можно получить скорость движения максимума температуры в пограничном слое

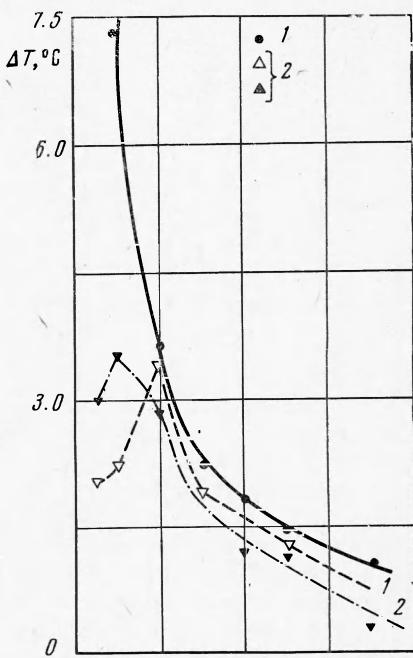
$$(2.4) \quad dx_m/d\tau = (a/2\tau)^{1/2}$$

и значение максимальной температуры

$$(2.5) \quad T(x_m, \tau) = \frac{\omega_2 T_S}{(2\pi e)^{1/2}} \frac{1}{\tau}$$



Фиг. 5



Фиг. 6

На фиг. 5 приведено сравнение скорости перемещения максимума температуры в тепловом пограничном слое, полученной на основании уравнения (2.4) с экспериментальными данными. На этой же фигуре показаны результаты, полученные из соотношения Микича и Розенова [11]. На фиг. 6 представлено изменение максимальной температуры в непосредственной близости пузырька в период его роста и сравнение с уравнением (2.5) для пузырьков 1 и 2. На фиг. 5 1 — экспериментально полученная скорость тепловой волны, 2 — результаты на основании модели Микича и Розенова; на фиг. 6 1 — уравнение (2.5), 2 — экспериментальные данные для пузырьков 1 и 2.

Согласие результатов измерений температуры в перегретом пограничном слое с теорией, базирующейся на существовании нестационарного пограничного слоя вокруг пузырька, подтверждает предположение, что перегретая жидкость около пузырька определяет механизм и характер роста пузырька в процессе кипения. Известно, что перегрев жидкости вблизи поверхности нагрева представляет собой флюктуирующую величину,

характер которой при существовании отдельных пузырьков можно достаточно точно описать аналитически. Хорошее описание возможно только на определенном расстоянии от поверхности нагрева. Для начала роста пузырька, получаем максимальную температуру в граничном слое $T_{\max}/\tau_0 = 24^\circ \text{C}$, которая существенно больше температуры стенки при данном тепловом потоке. Поэтому значение перегрева, полученное на основании измерений температуры стенки, представляет собой только среднее значение флуктуаций перегрева в непосредственной близости от обогреваемой поверхности. Приходим к выводу, что при рассмотрении перегрева жидкости вблизи поверхности нагрева при кипении необходимо принимать во внимание флуктуации перегрева и их статистический характер.

3. Статистический анализ флуктуаций перегрева при кипении. Имея в виду большое число различных влияний на значение отдельных параметров двухфазного граничного слоя, можно предположить, что все величины, определяющие перенос массы, энергии и количества движения, имеют статистический характер. Разработана методика статистической обработки величин перегрева в каждой точке двухфазного потока. Сигнал термопары рассматривался как случайная непрерывная функция, амплитудным статистическим анализом которой можно было получить распределение вероятностей каждой амплитуды рассматриваемого сигнала. При этом предполагалось, что рассматриваемая непрерывная функция удовлетворяет критерию эргодичности. В большинстве случаев температурные флуктуации в граничном слое удовлетворяли этому условию.

Амплитудный анализ. Сигнал термопары для каждого ее положения записывался на измерительном магнитофоне в течение $\tau_0 = 15 \text{ сек}$ при скорости записи $W_0 = 75 \text{ см/сек}$. Сигнал с магнитофонной пленки через линейный усилитель подавался на вход преобразователя частоты, в котором сигнал из аналоговой формы преобразовывался в цифровую, после чего направлялся в двоичный регистр. Из двоичного регистра сигнал подавался в цифровую вычислительную машину, которая проводила амплитудный анализ сигнала. Так как сигнал замедлялся в 16 раз (скорость пленки при обработке 4.7 см/сек) и осциллятор в цепи, переводящий сигнал в цифровую форму, работал на частоте 500 гц , продолжительность каждой дискретной амплитуды составляла $\Delta t = 0.12 \text{ мсек}$. В амплитудном анализе, берутся 120 000 амплитуд, что соответствует продолжительности сигнала $\tau_0 = 15 \text{ сек}$.

Если число амплитуд K -го уровня значения сигнала — H_K , где H — полное число рассматриваемых амплитуд, то вероятность появления K -й амплитуды в полном сигнале

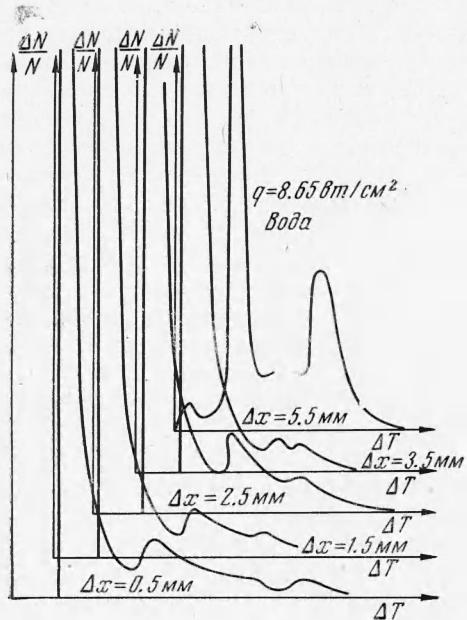
$$(3.1) \quad P(T_{K-1} \leq T \leq T_K) = H_K / H = \sum_K \Delta t_K / \Delta t_0$$

Таким образом, для плотности вероятности получим

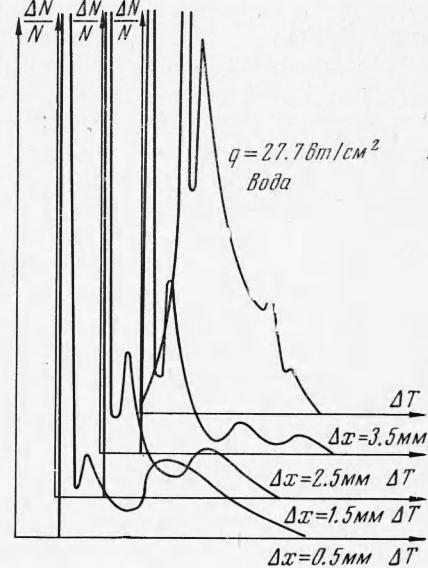
$$(3.2) \quad P(T) = P(T_{K-1} \leq T \leq T_K) / \Delta T$$

Измерялись температурные флуктуации в пяти различных положениях термопары $\Delta x = 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 5.5 \text{ мм}$ при кипении воды при атмосферном давлении и тепловом потоке $q = 8.65 \text{ вт/см}^2$. Полученные амплитудные распределения показаны на фиг. 7. Кипение в этих условиях соответствует режиму отдельных одиночных пузырьков. Положение термоэлемента, выбранное точно над центром парообразования, соответствовало режиму, рассмотренному в первой части работы. Из амплитудных распределений видно, что существует два характеристических перегрева жидкости в

каждой из рассматриваемых точек. Меньшее значение перегрева соответствует перегреву жидкости, которая находится на некотором удалении от поверхности раздела фаз, а большее значение — перегреву в тепловом пограничном слое вокруг пузырька. Перегрев жидкости, находящейся на удалении от поверхности раздела, принимает постоянное значение, а перегрев в тепловом пограничном слое имеет тот же характер, который получен при рассмотрении отдельных пузырьков в анализе фильмов. Поэтому результаты, приведенные на фиг. 7, относятся к флуктуациям температуры точно над одиночным центром парообразования.



Фиг. 7



Фиг. 8

При развитом пузырьковом кипении, когда число центров парообразования равномерно распределется по поверхности нагрева, наблюдается значительно меньшее влияние положения термопары на характер флуктуаций температуры вблизи поверхности нагрева. На фиг. 8 показаны амплитудные распределения флуктуаций температуры при кипении воды при тепловом потоке $q = 27.7 \text{ W/cm}^2$. Этот режим кипения соответствует развитому пузырьковому кипению. Четко видны два перегрева жидкости. Меньшее значение перегрева относится к перегреву окружающей жидкости, находящейся на определенном удалении от поверхности раздела фаз, большее — к перегреву в тепловом пограничном слое. В этом случае наблюдается значительно меньший перегрев окружающей жидкости, так как при таком режиме он представляет собой средний перегрев жидкости. Максимальный перегрев по характеру и по величине равен перегреву, показанному в случае одиночных пузырьков, подтверждая, таким образом, что сигнал флуктуации температуры содержит в себе информацию о перегреве в тепловом пограничном слое.

Перегрев жидкости на некотором расстоянии от поверхности нагрева флуктуирует в таком диапазоне амплитуд, который позволяет сделать предположение, что перегрев жидкости у стенки может быть значительно больше перегрева, полученного измерением температуры стенки.

Флуктуации температуры имеют строго определенный характер при различных условиях течения двухфазной смеси.

Анализ флуктуаций температуры в двухфазном потоке дает возможность определить среднее локальное объемное паросодержание двухфазной смеси.

Поступила 4 X 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. *Aladyev I. T.* On nature and regularities of liquid overheat. Internat. Seminar, 1971, Heat Transfer In Liquid Metals, Trogir, 1971.
2. *Stefanovic M., Afgan N.* Liquid superheat for vapor formation with and without presence of solid surface. Internat. J. Desalting Water, 1972, 10.
3. *Moore F. D., Mesler R. B.* The measurement of rapid surface fluctuations during nucleate boiling of water. A.I.Ch.E. Journal, 1961, vol. 7, No. 4.
4. *Semeria R.* Relation entre la structure de la couche dephasique près d'une paroi chauffante et les mecanismes d'échange. Heat and Mass Transfer in Turbulent Boundary Layers, vol. 2, Beograd, 1970.
5. *Каган Ю.* О кинетике кипения чистой жидкости. Ж. физ. химии, 1960, т. 24, вып. 1.
6. *Van Stralen S. J. D., Sluyter W. M.* Local temperature fluctuations in saturated pool boiling of pure liquids and binary mixtures. Internat. J. Heat and Mass Transfer, 1969, vol. 12, No. 2.
7. *Stefanovic M., Afgan N., Jovanovic Lj., Pišlar V.* Experimental investigation of the superheat boundary layer in forced convection boiling. Proc. IV Internat. Heat Transfer Conf., Paris, 1970.
8. *Afgan N., Stefanovic M., Jovanovic Lj., Pišlar V.* Determination of the statistic characteristics of temperature fluctuation in pool boiling. Internat. J. Heat and Mass Transfer (in press).
9. *Afgan N., Jovanovic Lj., Stefanovic M., Pišlar V.* An approach to the analysis of temperature fluctuation in two phase flow. Internat. J. Heat and Mass Transfer, 1973, vol. 16.
10. *Pišlar V., Afgan N., Stefanovic M., Jovanovic Lj.* Determination of micro thermocouple dynamic characteristics. Internat. Seminar, Herceg Novi, 1959.
11. *Mikić B. B., Rohsenow W. M.* Bubble growth rates in non-uniform temperature field. Progress in Heat and Mass Transfer, vol. 11. Pergamon Press, 1969.