

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ АДГЕЗИИ МЯСНОГО ФАРША

Д 1

В.М.Горбатов, Е.Т.Спирин, А.В.Горбатов

Явления адгезии наиболее многообразно проявляются при переработке мясопродуктов и существенно определяют технологические процессы перемешивания, измельчения, шприцевания. Практическое значение этого явления особенно велико в производстве формованных изделий, связанном с поточными, механизированными и автоматизированными линиями их выработки. Сведения о величине адгезионного взаимодействия необходимы для правильного выбора конструкционного материала, расчета и конструирования оборудования. Поэтому исследование адгезии мясного фарша является важной проблемой с научной и практической точек зрения.

Адгезионные свойства колбасного фарша, определяющие его контакт с рабочими поверхностями обрабатывающих машин и транспортирующих устройств, в основном определяются технологическими процессами их приготовления. Адгезионные свойства в качестве важного самостоятельного технологического фактора могут служить для оценки качества готового продукта /1,2/. Однако систематические и всесторонние исследования этих свойств мясопродуктов начали проводить только в последнее время /3,4/.

В работе исследовалось влияние различных факторов на адгезию мясного фарша, которая охарактеризована величиной удельного усилия отрыва.

Удельная адгезия (ρ_0) интерпретируется как усилие нормально-го отрыва (P_0) пластины от продукта на единицу площади пластины (F_0):

$$\rho_0 = \frac{P_0}{F_0} \text{ н/м}^2 \quad (I)$$

Адгезия зависит от условий измерения, т.е. геометрических, кинематических и динамических параметров прибора /I-4/.

Реализовать различные условия измерения позволяет разработанный и испытанный прибор /4/. Он отличается от описанного ранее /3/ следующим: усилие отрыва пластины измеряется по деформации тензометрической балки с записью сигнала на ленте осциллографа. Балка установлена так, что допускает тарировку до начала и после окончания опытов.

Адгезиометр (рис. I) представляет собой массивное основание, с двумя круглыми колоннами, служащими направляющими для перемещения каретки - деформатора. На деформаторе установлена тензометрическая балка, опирающаяся на цилиндрические призмы. В центре тензобалки имеется бобышка для закрепления верхней отрываемой пластины. В нижней части основания находится подъемно-опускной столик для закрепления пластины с образцом. Специально предусмотренные системы регулировки столика и подвижной каретки обеспечивают строгую центровку и параллельность пластин при отрыве. Прибор имеет несколько скоростей отрыва, получаемых от электродвигателя, и оснащен пластинами из разных материалов с различными классами чистоты поверхностей. Регистрация величины адгезионного взаимодействия осуществляется тензометрической установкой. Прибор позволяет реализовать многие переменные факторы.

Давление предварительного контакта (p_k) можно задавать любых значений от 300 до $3,5 \cdot 10^5$; рабочие пределы в основных

измерениях составляют от 300 до 6180 н/м². Длительность предварительного контакта (τ_k) выбирается произвольно: для исследования ее влияния на показания прибора - 3, 60, 180, 300, 600 сек.

Пластины из стали Ст.3, нержавеющей стали IX18H9T, дюралюминия, чугуна, фторопласта, латуни были изготовлены площадью (F_0): 0,0005; 0,0007; 0,0010; 0,0015 м². В основных экспериментах толщина слоя продукта (h) составляла 0,0003 м, в специальных исследованиях ее изменяли от 0,0003 до 0,003 м. Скорость отрыва верхней пластины (w_0) от продукта зависит от числа оборотов и диаметра шкивов, на которые наматывается тянущая нить. Она составляла 0,00167; 0,00358; 0,0093; 0,0193 м/сек. Скорость приложения силы w_0 н/сек определяется скоростью отрыва и величинами деформаций нити, тензобалки и продукта между пластинами.

Результаты экспериментов следует считать справедливыми в указанных пределах изменения переменных.

Особое значение имеет подготовка образцов к эксперименту. Для этого изготовлено приспособление, состоящее из набора входящих друг в друга полых цилиндров с ходовой посадкой. Внутренний диаметр каждого цилиндра соответствует диаметру пластины. Глубина опускания цилиндра необходимого диаметра фиксируется стопорным винтом. В образованное пространство вставляется пластина. Высота от пластины до кромки цилиндра измеряется с точностью 0,05 мм и соответствует толщине слоя фарша, излишки которого снимаются специальной лопаткой. Характер и время взаимодействия фарша с нижним диском не имеют значения, так как напряжение и время предварительного контакта относят к верхнему диску, отрыв которого производят. Перед нанесением фарша пластины однотипно очищали, обезжировали и сушили.

Относительная ошибка измерений, обусловленная измерительной

температурой и конструкцией прибора, не превышает $\pm 4\%$.

В явлениях адгезии участвует ряд механизмов на молекулярном и надмолекулярном уровнях, учитывать их очень затруднительно.

Для практических целей достаточно описать общие макроскопические закономерности явления. Для этого можно провести расчеты на заранее выбранной простейшей модели, которая представляет образец "сложной жидкости", находящейся между двумя жесткими дисками.

"Сложная жидкость" условно обладает одинаковой с фаршем адгезией. "Жидкость" имеет коэффициент поверхностного натяжения d (КПН). Смачиваемость пластины характеризуется $\cos \beta$, т.е. $d = d' \cdot \cos \beta$, где d' - КПН при полном смачивании. Большое количество воды в фарше и его сильная адгезия /1,4/ в значительной степени оправдывают такое представление.

Пластины прижимаются друг к другу силой молекулярного взаимодействия /5,6/:

$$P' = \frac{2d\Gamma}{h}, \quad (2)$$

где Γ - площадь действительного контакта в данный момент времени.

Приложение внешней силы P_0 , направленной в обратную сторону и равной P' , вызывает полный отрыв пластины за время τ_0 .

При этом внешняя сила P увеличивается линейно во времени τ :

$$P = w_c \cdot \tau \quad \text{или с учетом (1)} \quad P_0 = p \cdot \Gamma_0 = w_c \cdot \tau_0, \quad (3)$$

Уравнение (3) справедливо при ^{не}абсолютно жестком динамометре и $w_c \neq \infty$. Поэтому площадь контакта убывает линейно (в простейшем случае) за счет нарушения связей по дефектам структуры:

$$\Gamma = \Gamma_0 - c\tau, \quad (4)$$

где c - коэффициент пропорциональности зависит от состава фарша, активности контактирующих групп, размера частиц, характеризует темп убывания площади (ТЛП), м²/сек.

Давление взаимодействия пластины с фаршем убывает во время

действия отрывающего усилия; оно получается путем решения уравнений 2 и 4:

$$p' = \frac{P'}{F_0} = \frac{2\alpha F}{h F_0} = \frac{2\alpha}{h} \left(1 - \frac{c}{F_0} \tau\right). \quad (5)$$

В момент отрыва внутреннее p' и внешнее p_0 давления равны и направлены в противоположную сторону, т.е. $p' - p_0 = 0$.

Подставляя в (5) названные граничные условия и заменяя из (3) $\tau_0 = \frac{p_0 F_0}{w_c}$, получаем:

$$p_0 = \frac{2\alpha}{h} \cdot \frac{w_c}{w_c + \frac{2\alpha c}{h}}. \quad (6)$$

Экспериментальную проверку теоретических выводов выполнили для фарша русских сосисок при различных h и разных значениях влагосодержания. Фарш измельчали на куттере с тремя серповидными ножами, время куттерования - оптимальное $/2/$. Толщину слоя фарша меняли в пределах $(0,3 \div 1,0) \cdot 10^{-3}$ м, влагосодержание U (в кг воды на кг сухого остатка) имело значения: 2,21; 2,44; 2,70; 3,01. Зависимость (6) можно представить в следующем виде:

$$\frac{1}{p_0} = \frac{1}{2\alpha} h + \frac{c}{w_c}. \quad (7)$$

Она должна быть линейной, наклон прямой дает величину $\frac{1}{2\alpha}$, а отрезок, отсекаемый на оси ординат - $\frac{c}{w_c}$. Из графиков $\frac{1}{p_0}(h)$ видно, что теоретическое соотношение (7) хорошо выполняется при всех значениях влагосодержания и во всем интервале изменений h (рис. 2). С увеличением влагосодержания наклон прямых увеличивается, т.е. КПН уменьшается. Вместе с тем отрезок, отсекаемый на оси ординат, уменьшается, т.е. уменьшается численное значение ТУП (при постоянном значении w_c). Результаты, представленные на рис. 1, относятся к $p_k = 2350$ н/м² и $\tau_k = 300$ сек, пластинам $0,001$ м² из нержавеющей стали при скоростях отрыва $0,00358$ м/сек, приложения силы ~ 25 н/сек.

Детально теоретически объяснить эти закономерности трудно ввиду малой изученности механизма молекулярного взаимодействия в мясном фарше. Однако, упрощая проблему и принимая структуру фарша коагуляционного типа /I/, можно предположить следующее. При увеличении влагосодержания связь фарша с контактирующим материалом возрастает за счет белковых молекул в водном растворе прослоек между частицами и за счет увеличения площади контакта. Во-вторых связь фарша с контактирующим материалом убывает, так как поверхностное натяжение фарша уменьшается, приближаясь к значению поверхностного натяжения воды (0,08 н/м). Преобладанием первого или второго механизма адгезии объясняются изменения КПН и ТУП при различных влагосодержаниях.

В табл. I приведены значения коэффициентов, полученные по графику рис. I. Цифровые величины таблицы соответствуют высказанным соображениям об изменении коэффициентов.

Таблица I

Π	$\frac{\text{кг воды}}{\text{кг сух. ост.}}$	$w_c,$ н/сек	$c \cdot 10^4,$ м ² /сек	$\alpha,$ н/м
	2,21	26,3	25,0	17,5
	2,44	25,5	21,0	10,0
	2,70	25,0	16,5	5,6
	3,01	23,0	11,5	3,5

Влияние длительности предварительного контакта (τ_k) на величину адгезии фарша докторской колбасы (ФДК) исследовано для пластин из нержавеющей стали (н.ст.) и фторопласта-4 (Ф-4) при толщине слоя фарша 0,0003 м и давлении предварительного контакта 4900 н/м².

На рис. 3 показана экспериментальная зависимость адгезии от длительности контакта при различных скоростях отрыва $w_{cm}/\text{сек}/$,

что обуславливает и различную скорость приложения силы. При увеличении τ_k адгезия вначале растет интенсивно, затем стремится к выходу на постоянное значение. Определение КПН и ТУП проводили по соотношению (7). При $h = \text{const}$ отрезок, отсекаемый на оси ординат, дает величину $\frac{h}{2d}$, из которой определяется КПН; наклон прямой характеризует ТУП. Эти графики представлены на рис. 4. Они оказываются линейными в пределах погрешности эксперимента (около 10%). Увеличение времени предварительного контакта сопровождается ростом действительной площади контакта и количества ячеек, которые имеют максимальное сцепление с пластинами. Действительно, на рис. 4 расстояния между линиями с увеличением τ_k все более сближаются. Из этого следует, что связи между фаршем и поверхностью стремятся к насыщению. КПН, характеризующий энергию свободной поверхности фарша, также стремится к постоянному значению (рис. 5), при этом происходит полное смачивание. Для последнего случая ориентировочно можно оценить удельную работу адгезии по формуле (5,6) :

$$A_{y9} = d(1 + \cos \beta). \quad (8)$$

Такая оценка показывает примерно одинаковую величину удельной работы для фторопласта и нержавеющей стали (около 8,4 дж/м²). Из рис. 5 видно, что начальное значение КПН при $\tau_k = 0$ для пластин из фторопласта меньше, чем для нержавеющей стали. Это указывает на худшее смачивание фторопласта при малом времени контакта.

Примечательно, что наклон линий (рис. 4) в пределах разброса экспериментальных точек практически одинаков. Следовательно, темп разрыва связей определяется их прочностью, но не зависит от количества, которое непосредственно влияет на КПН. Таким образом,

ТУП не изменяется с увеличением времени предварительного контакта. Для ФДК в контакте с фторопластом получено среднее значение ТУП $(5,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-4}$, для нержавеющей стали $(8 \pm 1) \cdot 10^{-4}$ м²/сек. Отличие ТУП фарша в контакте с различными материалами объясняется различной интенсивностью молекулярного взаимодействия на границе раздела и в слое фарша.

Влияние материала и площади пластин на величину адгезии изучали при больших временах контакта (600 сек), когда КПН подвержен незначительным изменениям, и давлении контакта 4900 н/м², при котором геометрическая площадь пластины ($F_0 = 0,0007$ м²) и площадь истинного контакта (F_c) примерно совпадают. Толщина слоя фарша составляла 0,0003 м. В табл.2 приведены значения времени отрыва τ_0 , адгезии, скорости увеличения внешнего усилия w_c и ТУП для различных материалов.

Таблица 2

Материал	τ_0 , сек	p_0 , н/м ²	w_c , н/сек	$C \cdot 10^4$ м ² /с
Латунь	0,312	15450	34,6	10,4
Чугун	0,332	16050	33,8	9,4
Сталь Ст.3	0,356	16980	33,3	8,2
Нержавеющая сталь	0,360	18000	35,0	7,3
Фторопласт-4	0,476	18900	28,0	5,0
Дюралюминий	0,472	19600	29,0	4,8

Для определения ТУП зависимость (7) представлена в виде:

$$C = \left(\frac{1}{p_0} - \frac{h}{2d} \right) w_c = \frac{F_0}{\tau_0} - \frac{h w_c}{2d} \quad (9)$$

Подставляя в (9) значения постоянных величин, в том числе и КПН, равного по рис.5 4,2 н/м, получим расчетную формулу

$$C = \frac{1}{28 \cdot 10^4} \left(\frac{20}{\tau_0} - w_c \right), \quad (10)$$

по которой вычисляли ТУП для табл.2. Из сравнения величин адгезии и ТУП для разных материалов видно, что они передают изменения адгезии фарша к различным материалам - большей адгезии соответствует меньший ТУП. Полученный ряд адгезионной активности фарша к различным материалам (табл.2) совпадает с результатами других исследователей. /7/.

Величина ТУП зависит от геометрической площади пластин, так как при большей площади контакта число разрываемых в единицу времени связей возрастает. Зависимость $c(P_0)$ легко найти из соотношения (9). В табл.3 приведены определяющие величины и вычисленные значения ТУП.

Таблица 3

$F_0 \cdot 10^4 \text{ м}^2$	$T_0, \text{сек}$	$p_0, \text{н/м}^2$	$\frac{c}{w_c} \cdot 10^4$	$w_c, \text{н/сек}$	$c \cdot 10^4, \text{м}^2/\text{с}$
5	0,258	17500	0,214	34,0	7,3
7	0,356	16980	0,231	33,3	7,7
10	0,716	16150	0,261	22,5	5,9
15	0,791	14050	0,360	26,5	9,6

Из данных таблицы видна тенденция роста ТУП с увеличением F_0 , все точки ложатся на прямую, кроме значения ТУП при $F_0 = 0,0010 \text{ м}^2$. Это обусловлено тем, что не удалось везде получить одинаковых величин w_c . Если исключить влияние w_c на ТУП, т.е. взять отношения c/w_c , то они с увеличением F_0 возрастают. Таким образом, можно считать доказанным возрастание ТУП с увеличением площади. При этом следует учитывать, что определение ТУП возможно при известном КПН.

Представляет интерес, что число связей, разрываемых за 1 сек, оказывается сравнимым с общим числом связей между фаршем и пластиной. Действительно ТУП пропорционален числу связей, раз-

рываемых в 1 сек, а F_0 — общему числу связей: отношение $\frac{c}{F_0}$ составляет 0,5 — 1,5 сек⁻¹.

В заключение необходимо отметить, что полученная зависимость является первой попыткой теоретического обоснования адгезии мясопродуктов.

ВЫВОДЫ

1. Сконструирован, изготовлен и опробован прибор, позволяющий в широком диапазоне менять условия измерения: геометрические, кинематические и динамические его характеристики. Прибор можно применять для измерения адгезии колбасного фарша и других пищевых продуктов, имеющих структуру коагуляционного типа.

2. Получены теоретически и экспериментально обоснованные зависимости для расчета адгезии фарша к твердым поверхностям.

3. Вычислены значения темпа уменьшения площади контакта и коэффициента поверхностного натяжения при различных толщинах слоя и длительности предварительного контакта пластин с фаршем. Полученные значения инвариантны и являются объективными характеристиками фарша.

4. Найдены адгезионные характеристики фарша для разных материалов при различной площади контактирующих пластин; установлен ряд адгезионной активности материалов. Показано влияние скорости приложения силы и отрыва пластин при измерении адгезии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рогов И.А., Горбатов А.В. Новые физические методы обработки мясопродуктов. Пищевая промышленность, М., 1966.
2. Горбатов А.В., Горбатов В.М. Реология мясного фарша при куттеровании. Доклады на 15 Европейском конгрессе работников НИИ мясной промышленности, Хельсинки, Финляндия, 1969, 2-138.
3. Горбатов А.В. Приборы для определения свойств мясопродуктов на поверхности. 10 Европейский конгресс работников НИИ мясн.пром-ти, 1964.

4. Спириин Е.Т., Горбатов А.В. Исследование липкости колбасного фарша. "Тр. ВНИИМПа " , вып.22,1970, 113.
5. Путилов К.А. Курс физики, I, Физматгиз, М., 1963, 467.
6. Дерягин Б.В., Кротова Н.А. Адгезия. АН СССР, М.-Л., 1949, 14.
7. Медведева А.М. Исследование адгезионных явлений при креплении резин к металлам клеем на основе изоцианата. Дисс.канд.техн. наук. МИТХТ им.Ломоносова. М., 1967.

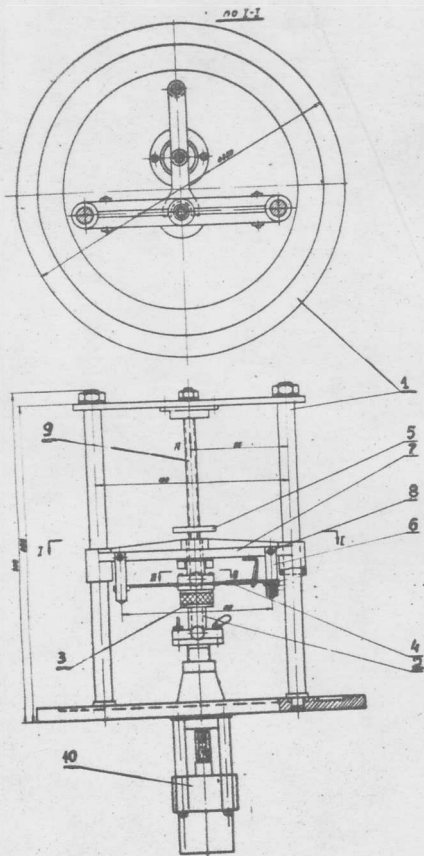


Рис. 1. Схема адгезиометра: 1 - подставка; 2 - микрометрический винт со столиком; 3 - пластина с продуктом; 4 - тензобалка; 5 - грузы для создания предварительного контакта; 6 - серьги; 7 - поперечина с хвостовиком; 8 - втулка; 9 - винт; 10 - привод.

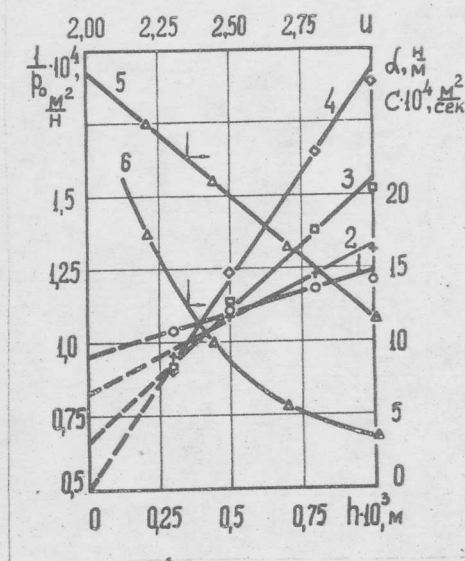


Рис. 2. Зависимость $\frac{1}{p_c}(h)$ для фарша русских сосисок при различных влагосодержаниях: 1 - 2,21; 2 - 2,44; 3 - 2,70; 4 - 3,01.

Зависимость коэффициентов C (5) и α (6) от влагосодержания.

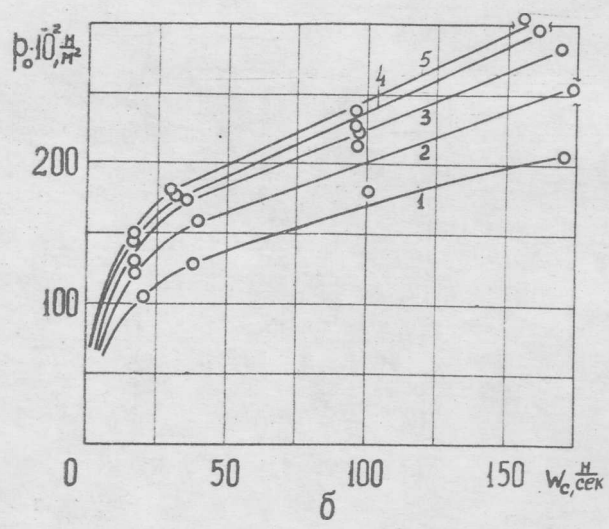
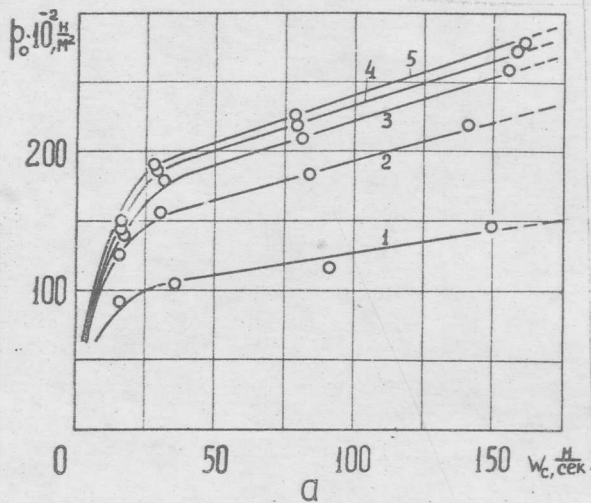


Рис. 3. Кинетические кривые изменения адгезии от времени контакта для фторопласта /а/ и нержавеющей стали /б/ при различных скоростях отрыва $w_c \cdot 10^3, м/сек$: 1-1,67; 2-3,58; 3-9,30; 4-19,3.

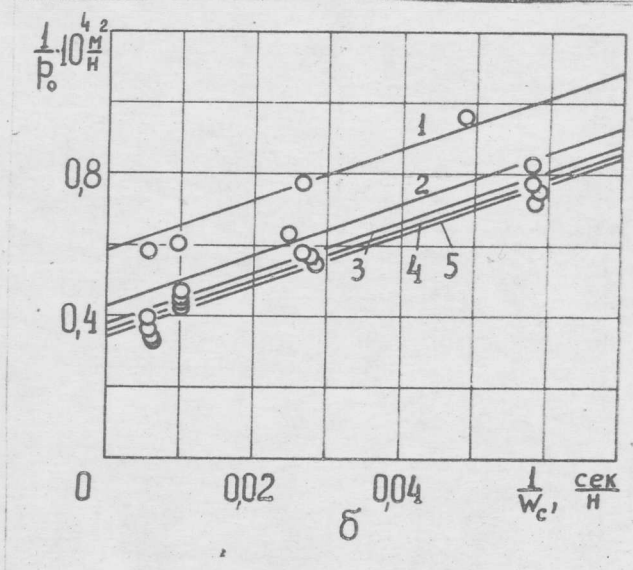
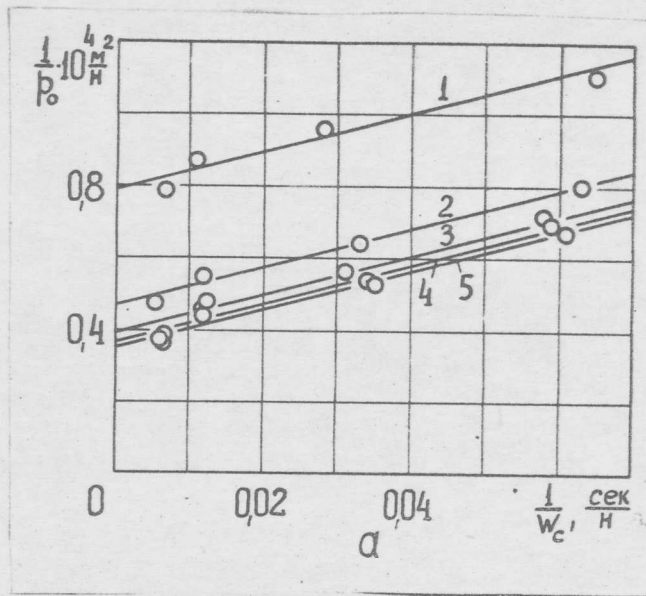


Рис. 4. Зависимости $\frac{1}{p_0} \left(\frac{1}{w_c} \right)$ для фторопласта (а) и нержавеющей стали (б) при различной длительности предварительного контакта: 1 - 3; 2 - 60; 3 - 180; 4 - 300; 5 - 600 сек.

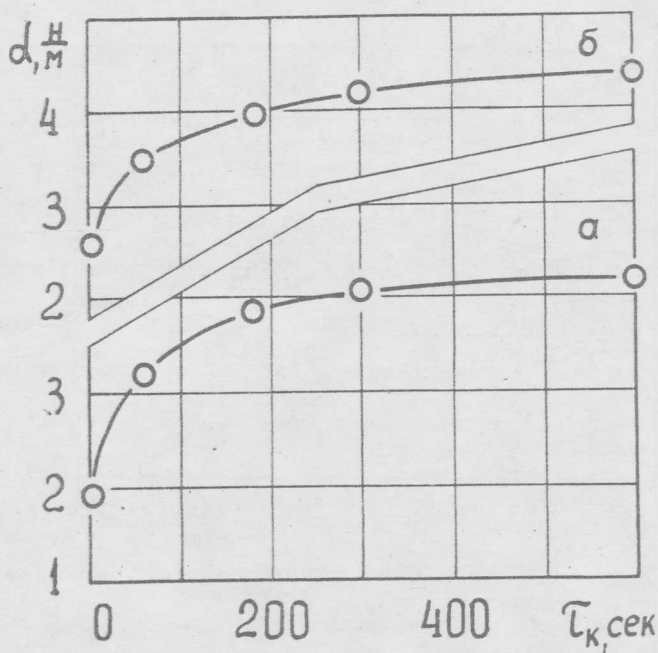


Рис. 5. Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от длительности контакта для пластин из фторопласта (а) и нержавеющей стали (б).