

Э. И. Левданский, И. М. Плехов, Н. П. Кохно

ИНЖЕНЕРНЫЙ РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СЕПАРАТОРОВ ЭЛЕМЕНТНОГО ТИПА

Из большого разнообразия технологических процессов, применяемых в полимерной и других отраслях промышленности, важное место занимают процессы разделения неоднородных смесей газ — жидкость. Вопросы разделения газожидкостных потоков весьма актуальны при абсорбции, ректификации, выпарке, реакционных и других процессах, так как неудовлетворительное разделение гетерогенных систем приводит к потере ценных продуктов, нарушению технологического режима на последующих стадиях, загрязнению сточных вод и газовым промышленным выбросам.

Для разделения газожидкостных потоков используются сепараторы разной конструкции. Наиболее перспективными являются центробежные сепараторы элементного типа (ЦСЭТ), промышленные испытания которых [1] показали их высокую эффективность и производительность.

Вариант ЦСЭТ, разработанный в Белорусском технологическом институте [1], представлен на рис. 1, а. Сепаратор состоит из патрубков 1 с завихрителем 2 в нижней части, жестко закрепленных в тарелке 3. В ЦСЭТ данной конструкции установлен многолопастный осевой завихритель. Существует другой вариант, в котором патрубки заглушены снизу, а на боковой поверхности патрубков, ниже полотна тарелки, для захода газожидкостного потока и придания ему вращательного движения имеются тангенциальные щели. При движении закрученного газожидкостного потока в патрубках капли жидкости центробежной силой отбрасываются на стенку. Отвод отсепарированной пленки жидкости осуществляется за счет наличия в верхней части отбойного колпачка 4. При этом жидкость в виде пленки, двигаясь вместе с газовым потоком вверх, попадает в зазор между колпачком и патрубком, сливается на тарелку, откуда через сливную трубу 5 выводится из аппарата. Очищенный газ через центральное отверстие выходит из элемента.

Сепаратор этой конструкции уже изготавливается серийно, им оснащаются газовые месторождения. Вместе



с тем промышленные испытания выявили и ряд недостатков: повышенное гидравлическое сопротивление, неустойчивую работу в режиме перехода от противоточного движения отсепарированной пленки к прямоточному, снижение эффективности при высоких скоростях газа за счет

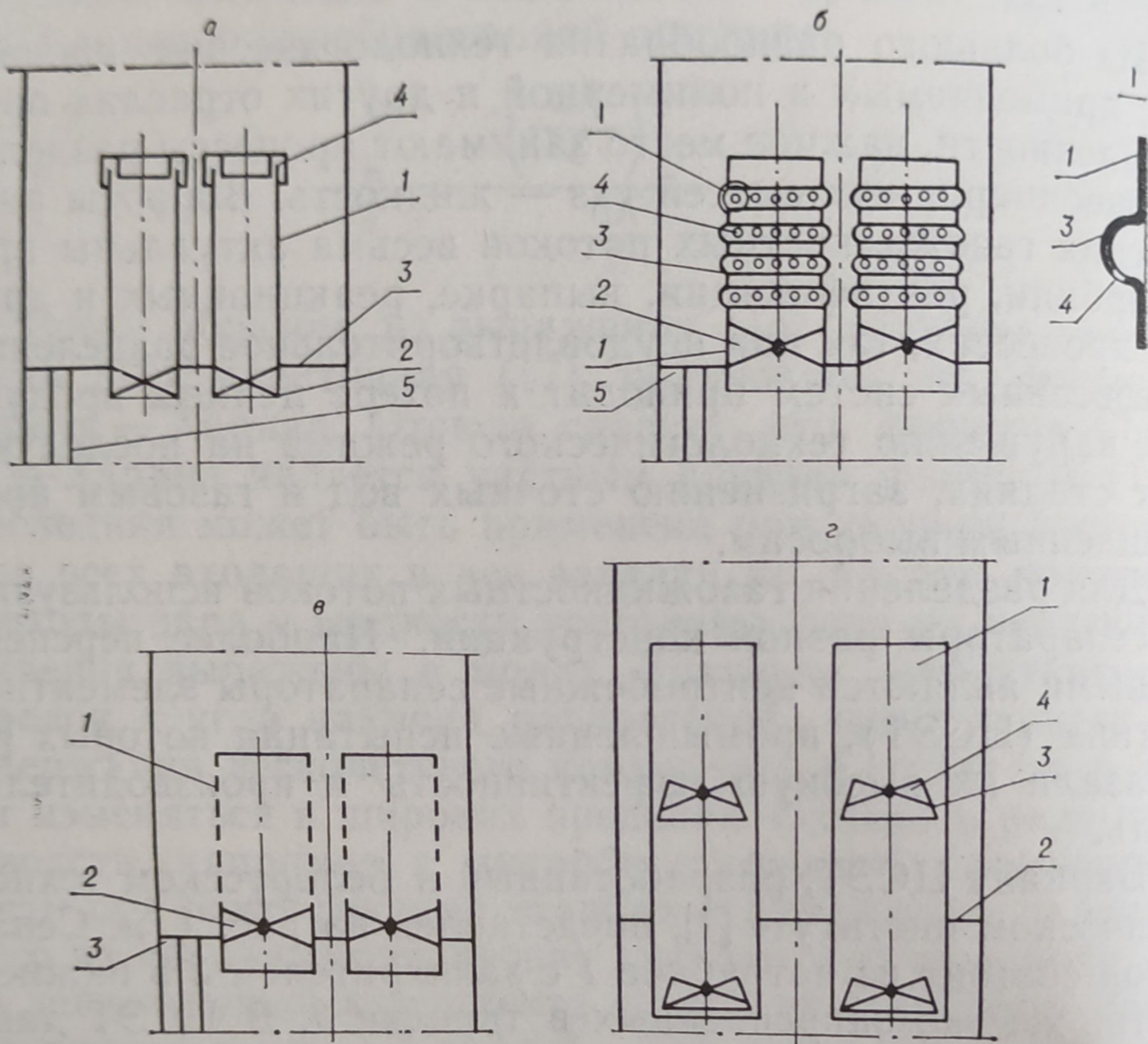


Рис. 1. Центробежные сепараторы элементного типа различных конструкций

вторичного уноса, обусловленного срывом капель с пленки.

Отмеченные недостатки устранены в ЦСЭТ новых конструкций [2, 3] (рис. 1, б, в). Для снижения вторичного уноса капель в этих сепараторах практически отсутствует пленочное течение отсепарированной жидкости.

В сепараторе одной из этих конструкций (рис. 1, б) [2] в тонкостенных цилиндрических патрубках 1 выше завихрителя 2 по высоте имеются несколько кольцевых канавок 3, обращенных наружу. В нижней части канавок расположены отверстия 4, которые направлены под углом в сторону полотна тарелки 5. При работе сепаратора газожидкостный поток проходит завихритель и кап-



ли, достигшие за счет центробежных сил стенки патрубка, попадают в ближайшую по высоте кольцевую канавку, откуда через отверстия выдавливаются в межпатрубковое пространство на полотно тарелки и далее через сливную трубу выводятся из аппарата. Расположение отверстий в кольцевой канавке под углом в сторону полотна тарелки исключает соударение струй жидкости соседних патрубков и повышает эффективность сепарации.

Особенностью конструкции сепаратора, изображенного на рис. 1, в [3], является то, что цилиндрические патрубки 1, закрепленные в тарелке 3, выше завихрителей 2 выполнены из фильтровальной сетки, в которой нити утка плотно прилегают друг к другу, а следовательно, отсутствуют отверстия, видимые на свету. В этом случае капли, достигнув стенки патрубка, сразу попадают в отверстие и выходят наружу в виде не мелких струй, а пленки, которая удерживается на наружной поверхности за счет сил поверхностного натяжения. В данной конструкции в широком диапазоне изменения нагрузок по жидкой фазе исключается вторичный унос.

Центробежный сепаратор, представленный на рис. 1, г [4], является противоточным и работает при низкой скорости газа в элементах. Он состоит из сепарационных патрубков 1, жестко закрепленных в полотне тарелки 2. Внутри патрубка по высоте с зазором к стенке установлены одна или несколько конических обечаяек 3, расширяющихся книзу. Внутри каждой обечайки имеется многолопастный завихритель 4. Отделение капель от газового потока осуществляется за счет центробежных сил закрученного потока. Отсепарированная жидкость в виде пленки стекает под действием сил тяжести вниз, в конический карман, образованный обечайкой и стенкой патрубка, где создается гидрозатвор, который исключает попадание газа в кольцевой зазор. При накоплении в гидрозатворе уровня жидкости выше, чем потери гидравлического напора в завихрителе, жидкость через зазор в виде крупных капель падает вниз.

Главное препятствие быстрого и широкого внедрения ЦСЭТ в производство — отсутствие инженерных методов расчета и проектирования, что связано с недостаточной изученностью процессов, происходящих в них.

Анализируя факторы, влияющие на унос капель жидкости из центробежных сепараторов, процесс разделения можно разбить на два этапа. Первый этап — осаждение



капель на стенках сепарационных патрубков за счет центробежных сил вращающегося газожидкостного потока и образование пленки жидкости. Унос определяют мелкие капли, которые не достигают стенки патрубка. Второй этап — движение пленки по стенке патрубка под воздействием газового потока. Здесь необходимо учитывать частичный унос капель, сорванных газовым потоком с поверхности волнистой пленки. Поэтому полный унос жидкой фазы с газовым потоком из ЦСЭТ определяется двумя составляющими:

$$E = E_1 + E_2,$$

где  $E_1$  — унос первого этапа сепарации, или первичный унос;  $E_2$  — унос второго этапа сепарации, или вторичный унос.

Величина первичного уноса жидкой фазы из центробежного сепаратора зависит прежде всего от размера капель, поступающих на разделение. Принимая, что на входе в сепарационные элементы капли равномерно распределены по всему сечению элемента, величину уноса (%) можно определить из следующей интегральной зависимости:

$$E_1 = 200 \int_0^1 f_1(\delta(\bar{r})) \bar{r} d\bar{r},$$

где  $f_1$  — функция распределения капель, поступающих в сепаратор, по размерам;  $\delta(\bar{r})$  — функция определения максимального диаметра уносимых капель, зависящая от радиуса входа в элемент;  $\bar{r} = r/R$  — относительный радиус места входа капли в сепарационный элемент;  $R$  — радиус сепарационного элемента. Следовательно, для определения  $E_1$  необходимо знать максимальный диаметр капель, уносимых из сепаратора, а также функцию распределения капель, поступающих с газовым потоком на разделение, по размерам.

Максимальный размер уносимых капель можно найти теоретически, путем составления и решения уравнений движения капли в поле центробежных сил.

Рассмотрим движение капли в цилиндрической системе координат  $r, \varphi, x$ . Ее положение в пространстве относительно системы координат определится радиусом-вектором  $\mathbf{P}$ :

$$\mathbf{P} = \mathbf{e} \cdot r + x \cdot \mathbf{k}, \quad (1)$$



где  $\mathbf{e}$  — единичный вектор в плоскости  $r, \varphi$ ;  $\mathbf{k}$  — единичный вектор в направлении оси  $x$ .

Продифференцировав выражение (1) по времени, получим полную скорость капли  $\mathbf{v}$ :

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{P}}{dt} = \frac{d\mathbf{e}}{dt} \cdot r + \mathbf{e} \frac{dr}{dt} + \frac{dx}{dt} \mathbf{k}. \quad (2)$$

Производная  $\frac{d\mathbf{e}}{dt}$  характеризует изменение положения единичного вектора  $\mathbf{e}$ , поэтому  $\frac{d\mathbf{e}}{dt} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt} \times \mathbf{e} = \vec{\omega} \times \mathbf{e}$  и выражение (2) можно записать как

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{P}}{dt} = (\vec{\omega} \times \mathbf{e}) r + \mathbf{e} \frac{dr}{dt} + \frac{dx}{dt} \mathbf{k}, \quad (3)$$

где  $\vec{\omega}$  — угловая скорость капли.

Продифференцировав выражение (3) по времени с учетом того, что производная от угловой скорости  $\vec{\omega}$  есть угловое ускорение  $\vec{\varepsilon}$ , получим ускорение капли в цилиндрической системе координат:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2\mathbf{P}}{dt^2} = & (\vec{\varepsilon} \times \mathbf{e}) \cdot r + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \mathbf{e}) r + 2(\vec{\omega} \times \mathbf{e}) \frac{dr}{dt} + \\ & + \mathbf{e} \frac{d^2r}{dt^2} + \frac{d^2x}{dt^2} \mathbf{k}. \end{aligned} \quad (4)$$

Согласно закону Ньютона  $m \cdot \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \sum \mathbf{F}$ , тогда, представив отдельные члены уравнения (4) через единичные векторы и в проекции на оси координат, получим систему уравнений [5—7]:

$$\begin{aligned} m \left( \frac{dv_r}{dt} - \frac{v_\varphi^2}{r} \right) &= \sum F_r, \\ m \left( \frac{dv_\varphi}{dt} + \frac{v_\varphi v_r}{r} \right) &= \sum F_\varphi, \\ m \frac{dv_x}{dt} &= \sum F_x, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $m$  — масса капли;  $v_r, v_\varphi, v_x$  — скорость капли в проекции на оси координат;  $F_r, F_\varphi, F_x$  — внешние силы в проекции на оси координат. Основными внешними силами, приложенными к капле, являются: сила аэродинамического сопротивления и сила тяжести капли. Сила тяжести  $\mathbf{F}_T = m\mathbf{g}$ , где  $\mathbf{g}$  — ускорение свободного падения. Сила



сопротивления  $F_c = \xi S \rho_r \frac{w_{отн}^2}{2}$ , где  $\xi$  — коэффициент аэродинамического сопротивления капли;  $S$  — площадь сечения капли;  $\rho_r$  — плотность газового потока;  $w_{отн}$  — относительная скорость капли,  $w_{отн} = w - v$  ( $w$  — скорость газового потока).

В проекции внешних сил на оси координат и при делении всех членов каждого уравнения системы (5) на  $m$  система принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dv_r}{dt} - \frac{v_\varphi}{r} &= \xi S \frac{\rho_r \omega_{r отн} |w_{отн}|}{2m}, \\ \frac{dv_\varphi}{dt} + \frac{v_\varphi v_r}{r} &= \xi S \frac{\rho_r \omega_{\varphi отн} |w_{отн}|}{2m}, \\ \frac{dv_x}{dt} &= \xi S \frac{\rho_r \omega_{x отн} |w_{отн}|}{2m} - g, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\omega_r$ ,  $\omega_\varphi$ ,  $\omega_x$  — проекции относительной скорости на оси цилиндрической системы координат.

Для решения системы уравнений (6) составляющие скорости газа  $\omega_r$ ,  $\omega_\varphi$  и  $\omega_x$  определяли путем аппроксимации опытных данных. Решение системы уравнений (2) осуществляли численным методом Рунге — Кутта с использованием постоянного шага на ЭВМ СМ4. Скорость капли на входе в элемент принимали равной скорости газа, что для капель малого размера ( $\delta < 30$  мкм) вполне оправдано. Систему уравнений (6) решали для начальных условий:  $t=0$ ;  $\bar{r}=0,01R$ ;  $x=0$ ;  $v_r=\omega_r=0$ ;  $v_x=\omega_x$ ;  $v_\varphi=\omega_\varphi$ .

При решении системы уравнений (6) определяли минимальный диаметр капель, которые достигают стенки сепарационного элемента в зависимости от конструктивных и режимных параметров.

Результаты решения уравнений (6) представлены на рис. 2, 3. Диаметр  $D$  и длина  $l$  сепарационного элемента оказывают наиболее сильное влияние на эффективность сепарации (рис. 2). Угол наклона лопастей завихрителя  $d$  и вязкость газового потока  $\mu_r$  также оказывают существенное влияние на размер капель, достигающих стенки элемента, в то время как средняя расходная скорость газа  $w_{ср}$ , плотность жидкости  $\rho_{ж}$  и газа  $\rho_r$  оказывают незначительное влияние (рис. 3).

При обработке расчетных данных получена формула для определения минимального диаметра капель, кото-



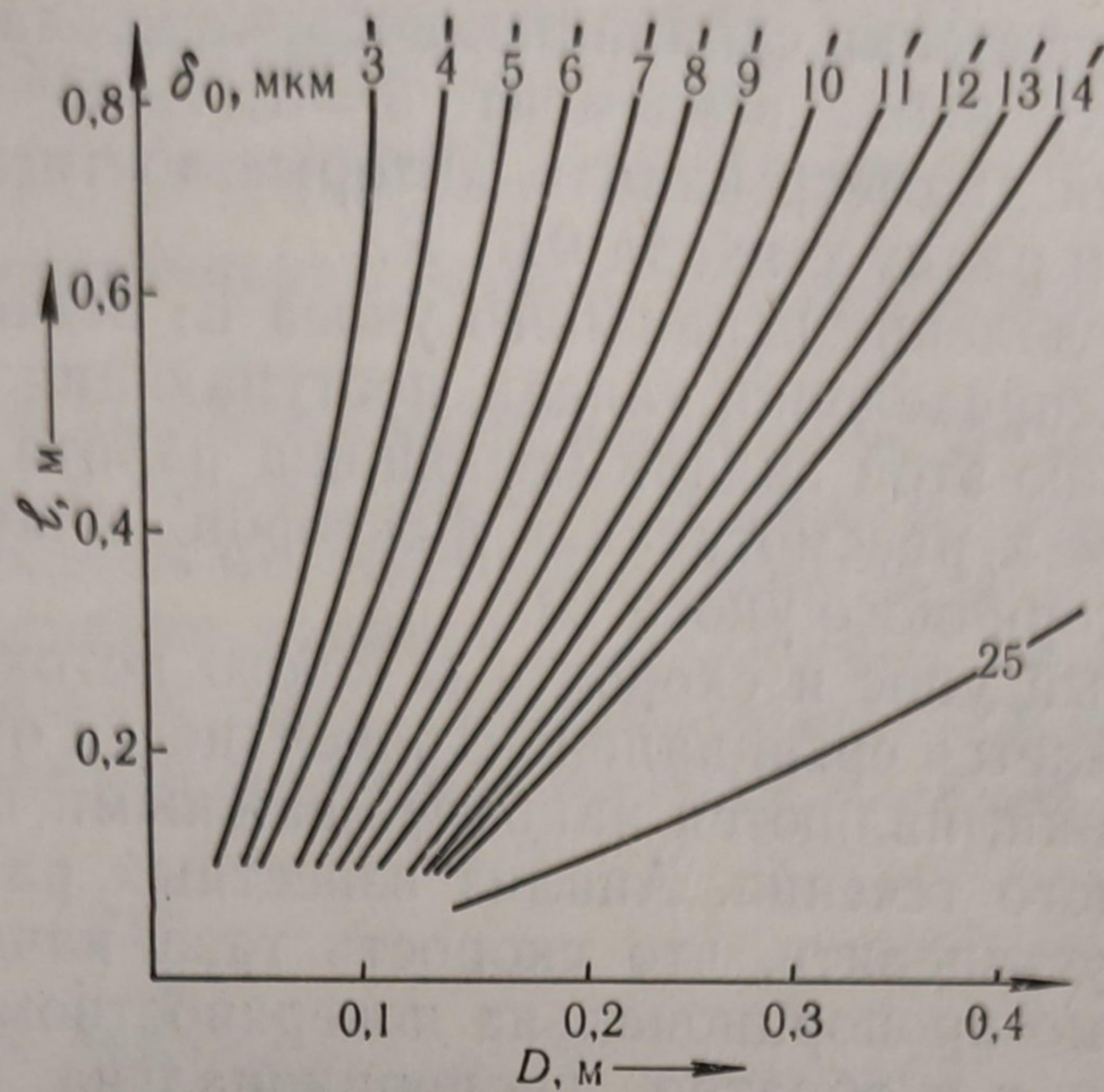


Рис. 2. Влияние длины и диаметра центробежного элемента на минимальный размер улавливаемых капель

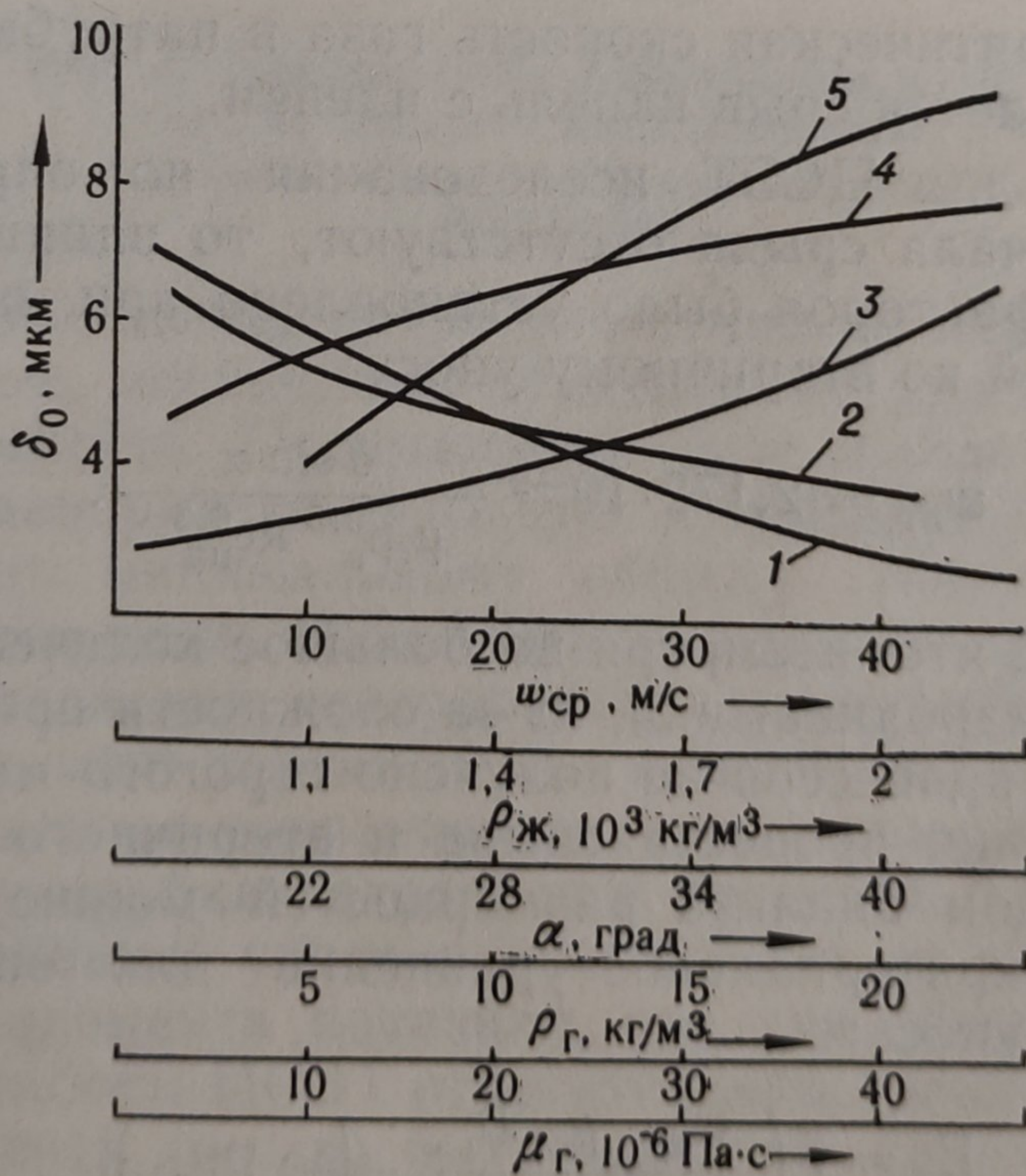


Рис. 3. Влияние скорости газа (1), плотности жидкости (2), угла наклона лопастей завихрителя (3), плотности (4) и вязкости (5) газа на минимальный размер улавливаемых капель в ЦСЭТ



рые достигнут стенки сепарационного элемента при изменении радиуса входа в элемент:  $\delta = \delta_0 (1 - \bar{r})^{0,2}$ , где  $\delta_0$  — минимальный диаметр капель, которые достигнут стенки элемента при радиусе входа  $0,01 R$ .

Для определения первичного уноса  $E_1$  остается найти функцию распределения капель, поступающих на сепарацию. Решению этой задачи посвящена работа [8], поэтому перейдем к рассмотрению факторов, влияющих на величину вторичного уноса  $E_2$ .

Вторичный унос и скорость газового потока, при которой начинается срыв капель с поверхности отсепарированной пленки, являются наиболее важными параметрами пленочного течения. Анализ известных работ [9, 10] позволяет установить, что скорость газа начала срыва капель прямо пропорциональна поверхностному натяжению пленки  $\sigma$  и обратно пропорциональна плотности, вязкости газа, а также критерию Рейнольдса пленки  $Re_{пл}$ :

$$\omega_{кр} = f \left( \frac{\sigma}{\mu_g \rho_g Re_{пл}} \right),$$

где  $\omega_{кр}$  — критическая скорость газа в патрубке, при которой начинается срыв капель с пленки.

Так как для ЦСЭТ исследования по определению скорости начала срыва отсутствуют, то влияние выше-названных факторов было установлено при проведении исследований по вторичному уносу:

$$\omega_{кр} = 2,172 \cdot 10^{-2} \frac{\sigma \sin \alpha}{\mu_g \rho_g^{0,5} Re_{пл}^{0,3}}.$$

Отметим, что, несмотря на большое количество работ в области гидродинамики, из-за сложности протекающих физических процессов не получено строгого математического описания процесса срыва и вторичного уноса капель. Методом анализа размерностей можно получить следующее критериальное уравнение для определения вторичного уноса:

$$E_2 = f \left( \frac{\omega_{ср}, \rho_g, D}{\sigma}; \frac{l}{D}; Re_{пл} \right),$$

где  $\omega_{ср}$  — средняя расходная скорость газа в элементах. Окончательный вид уравнения был определен после обработки экспериментальных данных:



$$E_2 = 0,01154 \left( \frac{\rho_r \left( \frac{\omega_{\text{ср}} - \omega_{\text{кр}}}{\sin \alpha} \right)^2 D}{\sigma} \right)^{0,5} \times \exp(0,053\bar{l} - 8,2 \cdot 10^{-4} \text{Re}_{\text{пл}}),$$

где  $\bar{l}$  — относительная длина сепарационного элемента,  $\bar{l} = l/D$ .

С целью подтверждения корректности полученных зависимостей и определения эмпирических коэффициентов были проведены исследования уноса из ЦСЭТ.

Исследование влияния угла наклона лопастей завихрителя на унос (рис. 4) проводилось при средней расходной скорости газа в элементе 20 м/с и расходе жидко-

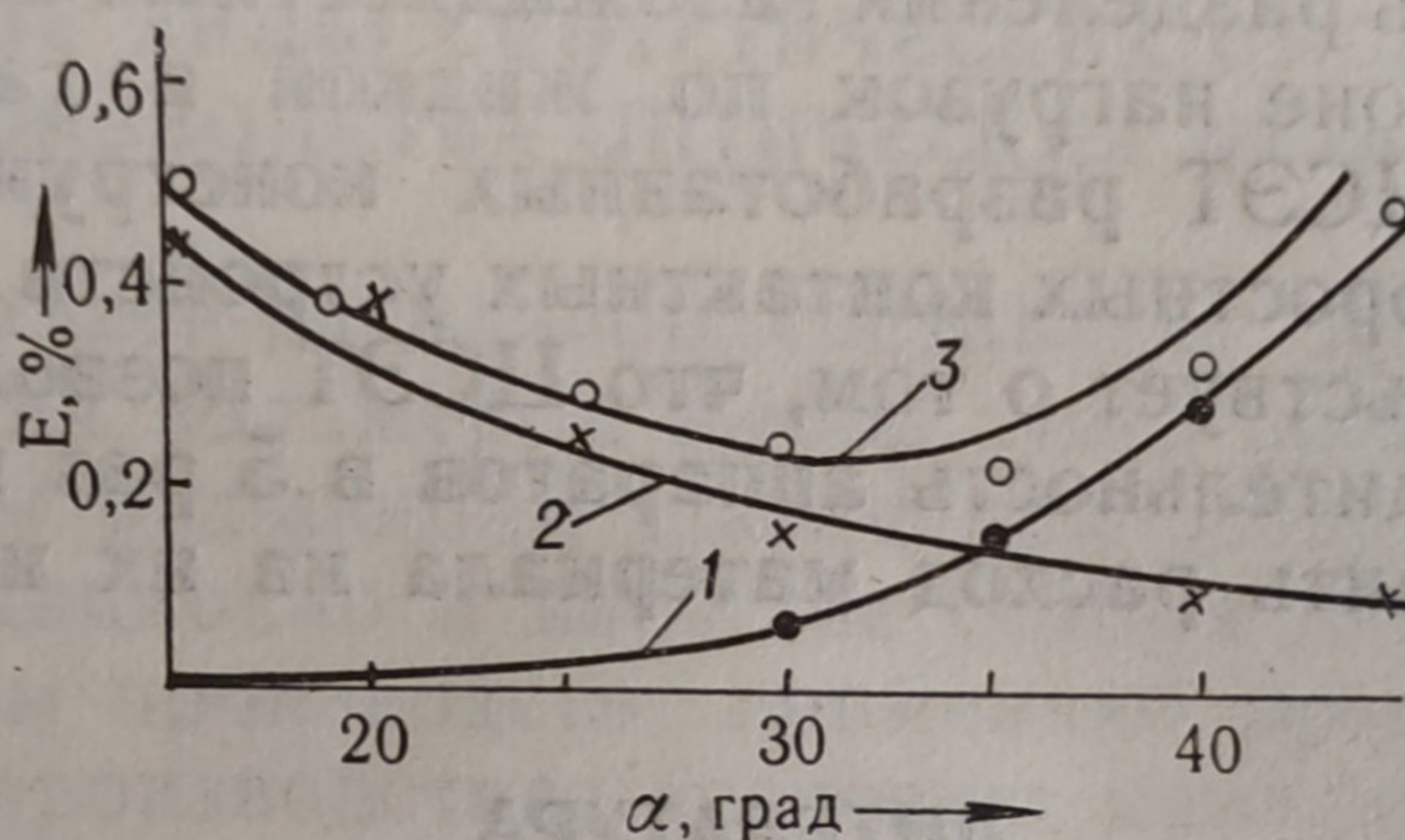


Рис. 4. Влияние угла наклона лопастей на унос из центробежных элементов:

1 — первичный унос; 2 — вторичный унос; 3 — общий унос

сти 0,04 кг/с. Анализируя расчетные и экспериментальные данные, необходимо отметить их удовлетворительную сходимость. Оптимальный угол наклона лопастей осевого завихрителя находится в пределах 30—35° и соответствует минимальному общему уносу 0,2—0,3 % (для конструкции ЦСЭТ, изображенной на рис. 1, а). При исследовании сепараторов с закруткой потока на входе в элемент вертикальными тангенциальными щелями оптимальное значение отношения площади щелей к площади патрубка находится в пределах 0,8—1,0.

Исследование уноса в зависимости от длины сепарационного элемента показало, что для обеспечения нормальной работы ЦСЭТ относительная длина сепарационного элемента должна быть больше 3. При аналогичных условиях изучено влияние диаметра сепарационного элемента на величину уноса. С возрастанием диаметра элемента наблюдается значительное возрастание уноса.



Установлено, что изменение скорости газового потока и плотности орошения (расхода жидкости) не оказывает столь существенного влияния на величину уноса.

Как отмечалось ранее, конструкции ЦСЭТ, изображенных на рис. 1а, б, в, практически позволяют исключить вторичный унос из сепарационного элемента. Этот факт подтвержден экспериментальными исследованиями, показавшими, что полный унос из данных ЦСЭТ обусловлен лишь первичным уносом.

Таким образом, изложенная методика расчета эффективности ЦСЭТ может с успехом использоваться в инженерной практике проектирования сепарационных аппаратов, а проведенные исследования показали высокую эффективность разделения газожидкостных потоков в широком диапазоне нагрузок по жидкой и газовой фазе с помощью ЦСЭТ разработанных конструкций. Опыт внедрения скоростных контактных устройств в производство свидетельствует о том, что ЦСЭТ позволяют увеличить производительность аппаратов в 5 раз и более чем в 2 раза снизить расход материала на их изготовление [11, 12].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Плехов И. М., Ершов А. И. Исследование прямоточного центробежного сепаратора // Хим. и нефт. машиностроение.— 1971.— № 8.— С. 15, 16.
2. А. с. 827124 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 01 45/12. Центробежный сепаратор / Э. И. Левданский, А. И. Карпович, И. М. Плехов и др. (СССР).— № 2795646/23—26; Заявлено 11.07.79; Опубл. 7.05.81, Бюл. № 17.— 2 с.
3. А. с. 1228880, МКИ<sup>4</sup> В 01 45/12. Центробежный сепаратор / Э. И. Левданский, И. И. Гавриленкова, А. И. Карпович, И. М. Плехов (СССР).— № 3816688/23—26; Заявлено 28.11.84; Опубл. 7.05.86, Бюл. № 17.— 3 с.
4. А. с. 929168, МКИ<sup>3</sup> В 01 45/12. Сепаратор / Э. И. Левданский, И. М. Плехов, М. И. Шибутович, И. И. Гавриленкова (СССР).— № 2542590/23—26; Заявлено 15.11.77; Опубл. 23.05.82, Бюл. № 99.— 3 с.
5. Соу С. Гидродинамика многофазных систем.— М., 1971.— 536 с.
6. Фукс Н. А. Успехи механики аэрозолей.— М., 1961.— 160 с.
7. Медников Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей.— М., 1981.— 174 с.
8. Левданский Э. И., Волк А. М., Плехов И. М. О законе распределения частиц при дроблении // Теорет. основы хим. технологии.— 1986.— Т. 20, № 5.— С. 672—677.
9. Макаров Н. А. Исследование критической скорости срыва влаги со стенки паропровода // Теплоэнергетика.— 1959.— № 2.— С. 50—53.
10. Чан-Ше-Фу, Ибеле В. Потери напора и толщины жидкой



пленки при кольцевом двухфазном чисто пленочном течении и течении с образованием эмульсии // Теплопередача.— 1964.— № 1.— С. 43—47.

11. Левданский Э. И., Плехов И. М., Гавриленкова И. И. Промышленное внедрение прямоточно-центробежных сепараторов элементного типа // Хим. пром-сть.— 1981.— № 3.— С. 168—170.

12. Левданский Э. И., Карпович А. И., Плехов И. М. и др. Применение скоростных контактных устройств в производстве капролактама // Хим. пром-сть.— 1984.— № 10.— С. 598—599.