

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКОВ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КАНАЛАХ СО СТАТИЧЕСКИМИ ЗАКРУЧИВАТЕЛЯМИ НА ВХОДЕ

Comparative experimental researches establish influence of a design static twister on structure of a stream in cylindrical channels of contact devices.

Согласно имеющимся публикациям [1, 2], весьма перспективным направлением признано использование в тепломассообменных аппаратах закрученных потоков, поступательное движение которых сопровождается вращательным, происходящих в их поперечных сечениях. Такая форма движения благодаря влиянию центробежных сил приводит к существенному изменению структуры обычного осевого потока, к интенсификации процессов переноса теплоты и распределяемого вещества при взаимодействии фаз и позволяет снизить металлоемкость оборудования. Последнее обстоятельство играет особо важную роль при проведении технологических процессов в многоступенчатых колонных аппаратах, широко применяемых в нефтепереработке и химической технологии. Из-за ограниченных скоростей потоков диаметры типовых ректификационных колонн (с колпачковыми, клапанными и ситчатыми тарелками) на крупнотоннажных установках типа АТ-6 достигли 8–9 м, а насадочных абсорберов и контактных аппаратов – 16 м, что является фактически пределом дальнейшего увеличения габаритов по условиям изготовления, транспортировки и эксплуатации.

Для существенного увеличения производительности подобных аппаратов необходимо переходить от противоточного и перекрестноточного движения газо(паро)жидкостных потоков в зоне взаимодействия фаз к прямоточному с применением новых скоростных контактных устройств. Эти обстоятельства послужили основой для создания контактных устройств с прямоточно-центробежными элементами [2], которые по своим функциям соответствуют обычным массообменным тарелкам, если даже они включают в себе один элемент.

При всем многообразии перерабатываемых сред, технологических режимов ведения процесса и внешних условий любая конструкция не может быть универсальной. Поэтому с участием авторов созданы на уровне изобретений [3–7] контактные устройства различного назначения: без рециркуляции жидкости (рис. 1, а, б), с рециркуляцией жидкости на ступени (рис. 1, в, г), с некоторыми отличиями по формированию закрученного потока и подводу жидкости в зону контакта (рис. 2).

Общим для всех вариантов является то, что при противотоке фаз по аппарату в целом ос-

новное взаимодействие их происходит внутри элементов в восходящем закрученном потоке с последующей сепарацией за счет центробежных и гравитационных сил.

Необходимым условием широкого применения нового оборудования в производстве является наличие информации и расчетных зависимостей для определения таких рабочих характеристик, как потери напора на гидравлическое сопротивление, интенсивность массообмена, или КПД контактной ступени, эффективность сепарации фаз. В свою очередь, они существенно зависят от гидродинамических режимов и структуры потоков. Ранее экспериментальными исследованиями [8] были установлены некоторые особенности закрученного потока в цилиндрических трубах ограниченной длины, однако они не позволяют объективно оценивать совершенство тех или иных конструкций. Исходя из анализа имеющейся информации, нами принято решение о проведении дополнительных сравнительных исследований с целью изучения влияния способа закрутки на структуру потока и выбора из уже предложенных закручивающих узлов (рис. 2) оптимального варианта технологичного в изготовлении и обеспечивающего хорошее взаимодействие фаз в зоне контакта с их последующей эффективной сепарацией. Опыты проведены на лабораторной установке, схема которой представлена на рис. 3. Исследуемые объекты представляли собой сменные цилиндрические трубы 8 диаметром 32, 70 и 100 мм, изготовленные из оргстекла. На входе в них поочередно устанавливались статические закручивающие устройства 7, выполненные в виде: двухзаходных шнеков при отношении шага подъема винтовой линии к диаметру  $l/D = 0,875$  и  $1,56$ ; многолопастных шнеков с углом наклона лопастей к горизонту  $30^\circ$ ; тангенциальных прорезей в боковой стенке при отношениях их площади к площади трубы  $F_{пр}/F_{тр} = 0,436$  и  $0,872$ . В качестве модельной среды служил воздух, транспортируемый газодувкой 1 в приемную камеру б, на которой монтировались съемные отпыльные образцы. Расход воздуха регулировался заслонкой 2, а измерялся с помощью диафрагмы 3 и наклонного микроманометра 4 МКВ-250-0,02 с точностью 0,01 мм вод. ст. Средняя скорость потока воздуха изменялась в диапазоне 5–30 м/с.

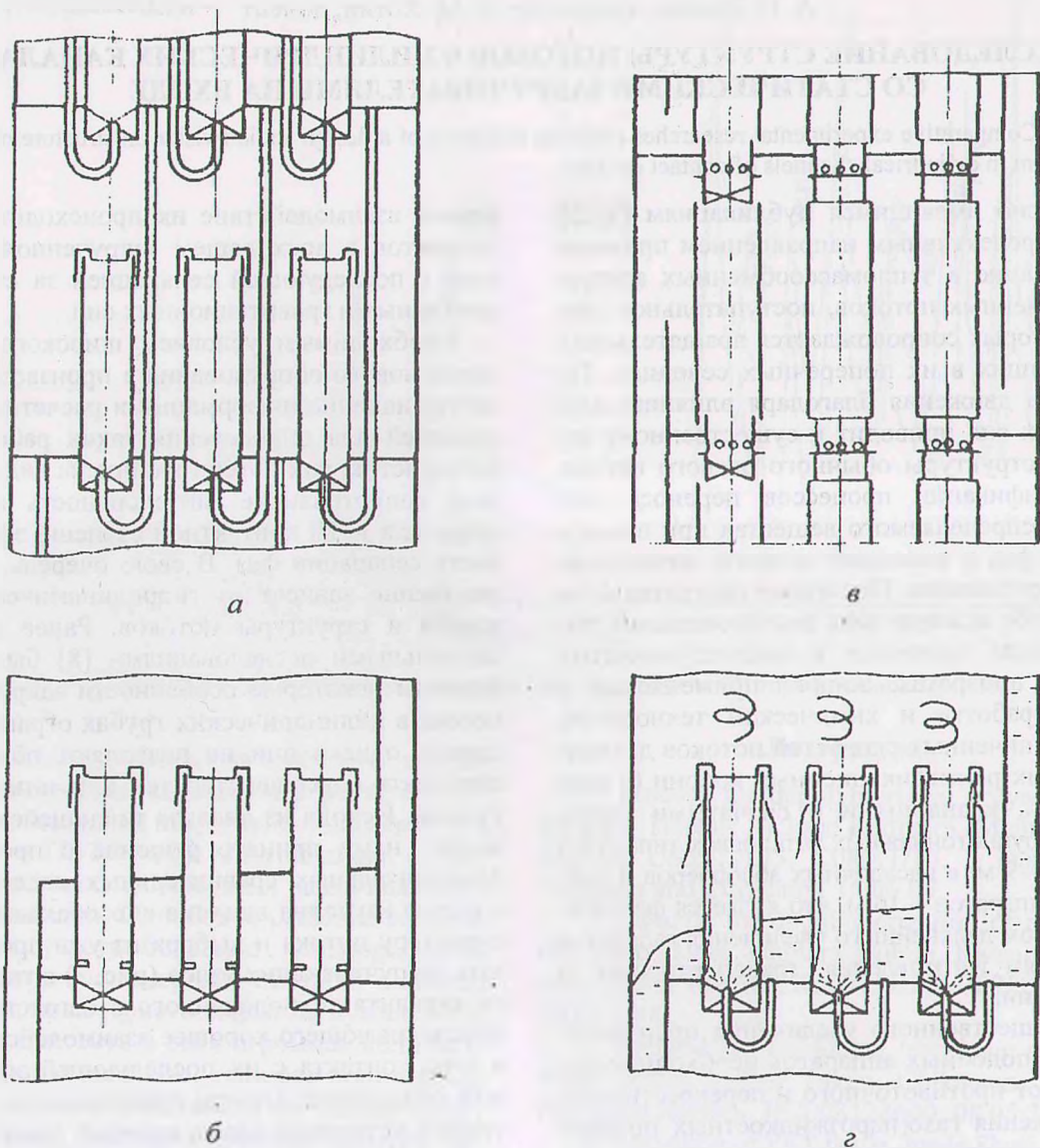


Рис. 1. Контактные устройства ректификационных колонн с прямоточно-центробежными элементами: *а, б* – без рециркуляции жидкости; *в, г* – с рециркуляцией жидкости

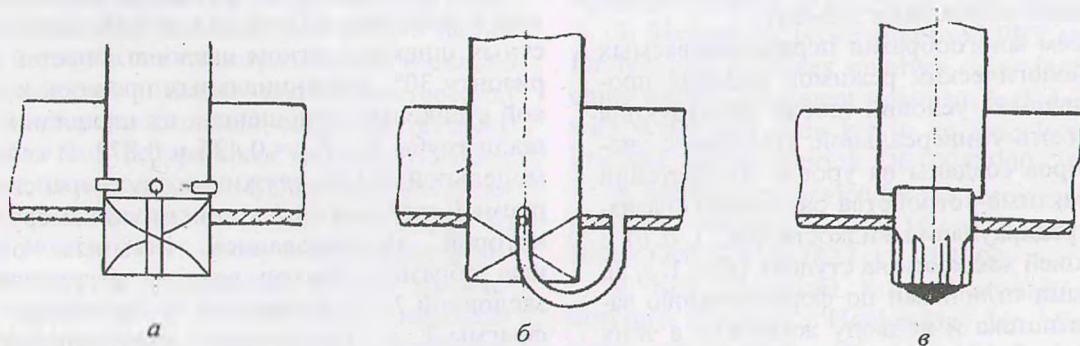


Рис. 2. Способы закрутки потока и подвода фаз в контактные элементы: *а* – шнековый; *б* – многолопастный; *в* – тангенциальный

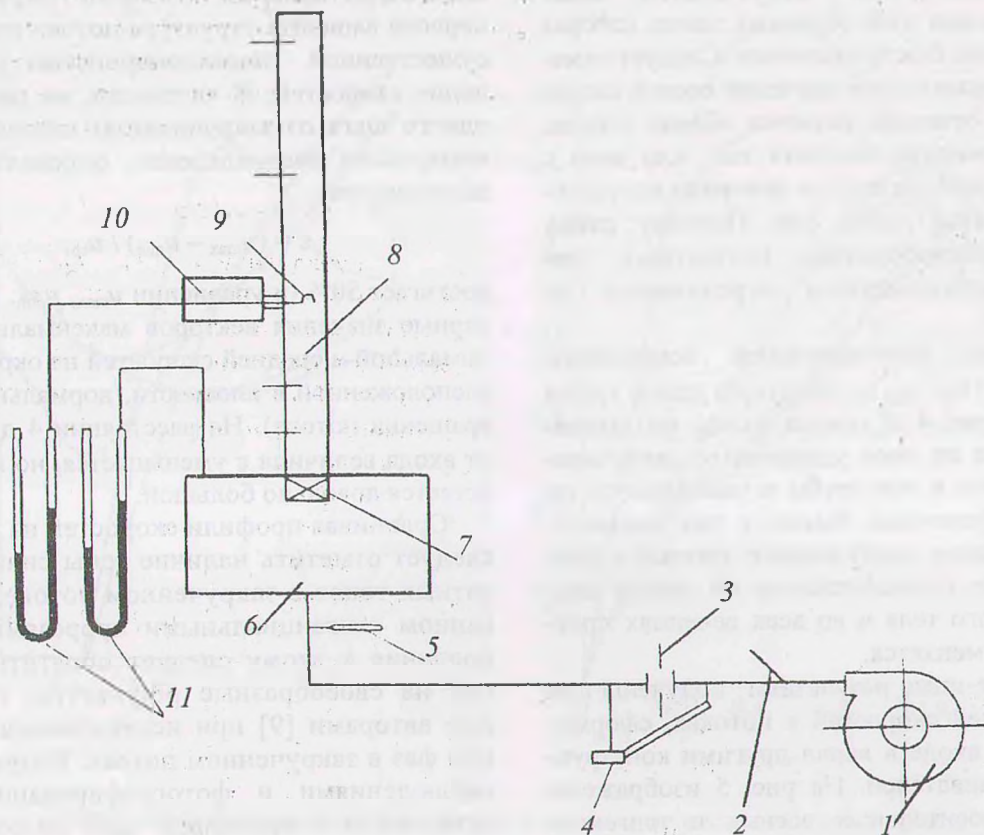


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Измерение профилей скоростей производилось в пяти сечениях по длине на расстояниях 2, 4, 8, 13 и 20 диаметров от входа с помощью датчиков 9 и дифманометров 11. Использовалась методика раздельных замеров: угла направления течения двухканальным датчиком со скошенными кромками, полного и статического давлений с помощью трубок Пито, которые были изготовлены из медицинских игл диаметром 2 мм (с целью минимизации негативного воздействия на поток) и протарированы в аэродинамической трубе ИТМО НАН. Для перемещения их по радиусу и поворота вокруг своей оси использовался специальный координатник 10, описанный в [8]. Замеры осуществлялись следующим образом. Вначале с помощью 2-канального датчика определялся угол направления потока в 15 точках по радиусу, причем он перемещался от противоположной стенки к центру трубы. Поскольку при подходе к оси чувствительность датчика снижалась, для корректировки полученных данных проводились измерения в симметрично расположенных точках по другую сторону оси. Затем вместо угломера устанавливались последовательно датчики полного и статического давлений под углами, равными ранее замеренному углу

атаки потока. Измерения повторялись в каждой точке при одинаковых режимных параметрах до трех раз для обеспечения хорошей воспроизводимости результатов замеров. По измеренным величинам угла направления потока, полного и статического давлений определялись профили осевой, тангенциальной и среднерасходной скоростей в каждом сечении. В тех случаях, когда по замеренным результатам нельзя было провести плавную кривую, проводилась аппроксимация профиля с помощью программы минимизации функционала. При этом участок измерения разбивался на две части, на каждой из которых по опытным данным подбирался полином не выше третьей степени. При сшивании выполнялось условие равенства значений функций и их первых производных. Получаемые таким образом величины использовались для дальнейших расчетов на ЭВМ и графических построений.

На рис. 4, а представлены профили относительной осевой скорости  $V_z = u_z/u_{ср}$ , измеренной в пяти сечениях закрученного потока, сформированного статическим многолопастным закручивателем на входном участке цилиндрического канала с углом наклона лопастей к горизонту  $30^\circ$ . Согласно рисунку, в центре трубы,

непосредственно после закручивателя, имеет место небольшая зона обратных токов, которая затем довольно быстро исчезает. Следует отметить, что максимальное значение осевой скорости во всех сечениях остается вблизи стенки, т. е. у поверхности контакта газа или пара с жидкой пленкой, однако ее значение постепенно уменьшается вдоль оси. Поэтому длину прямоточно-центробежных контактных элементов  $l$  рекомендуется ограничивать до  $l = 2,5-4,0D$ .

Изменение тангенциальной компоненты скорости  $V_\varphi = u_\varphi / u_{ср}$  по радиусу и длине трубы показано на рис. 4, б, откуда видно, что максимум скорости по мере удаления от закручивателя смещается к оси трубы и уменьшается по абсолютной величине. Вместе с тем тангенциальное движение закрученного потока в центральной зоне осуществляется по закону вращения твердого тела и во всех сечениях практически не изменяется.

Несколько иные результаты получены при изучении полей скоростей в потоках, сформированных на входе в канал другими конструкциями закручивателей. На рис. 5 изображены профили относительных осевых и тангенциальных скоростей, замеренных в двух сечениях потока со шнековым двухзаходным закручивателем, а также по данным работы [8] для закрученного потока тангенциальными щелями при практически одинаковом их гидравличе-

ском сопротивлении. Согласно графикам, для первого варианта структура потока отличается существенной неравномерностью распределения скоростей. В частности, на расстоянии одного шага от закручивателя степень неравномерности распределения, определяемая по зависимости

$$\varepsilon = (u_{\max} - u_{\min}) / u_{ср},$$

достигает 50% (в уравнении  $u_{\max}$ ,  $u_{\min}$ ,  $u_{ср}$  — скалярные значения векторов максимальной, минимальной и средней скоростей на окружности, расположенной в плоскости, нормальной к оси вращения потока). На расстоянии 4 диаметров от входа величина  $\varepsilon$  уменьшается, но все равно остается довольно большой.

Сравнивая профили скоростей на рис. 5, а, следует отметить наличие зоны сильных обратных токов в закрученном потоке, образованном тангенциальными прорезями. В дополнение к этому следует обратить внимание на своеобразные результаты, полученные авторами [9] при исследовании сепарации фаз в закрученном потоке. Визуальными наблюдениями и фотографированием они установили в приосевой зоне наличие воздушного «шнура» с некоторым количеством жидкости в виде мелких капель пленки. Попытка освободиться от них путем увеличения центробежного эффекта к желаемому эффекту не привела.

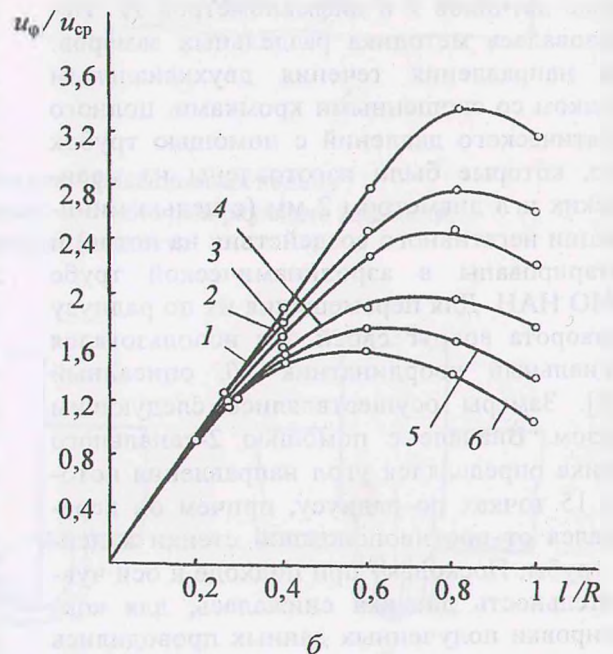
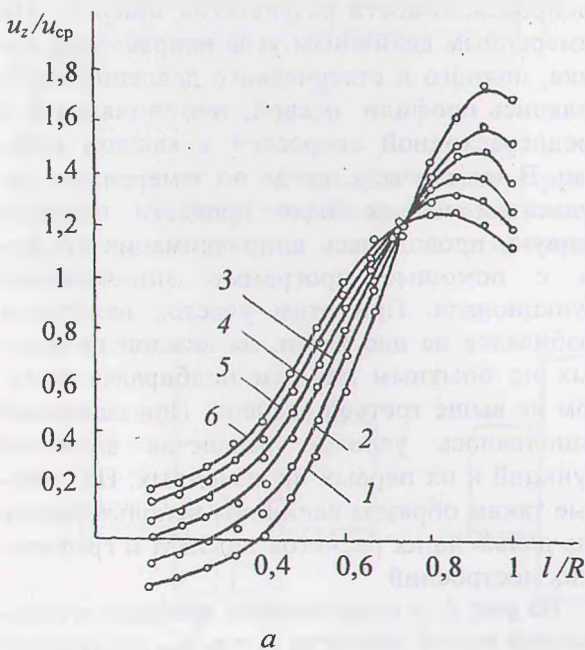
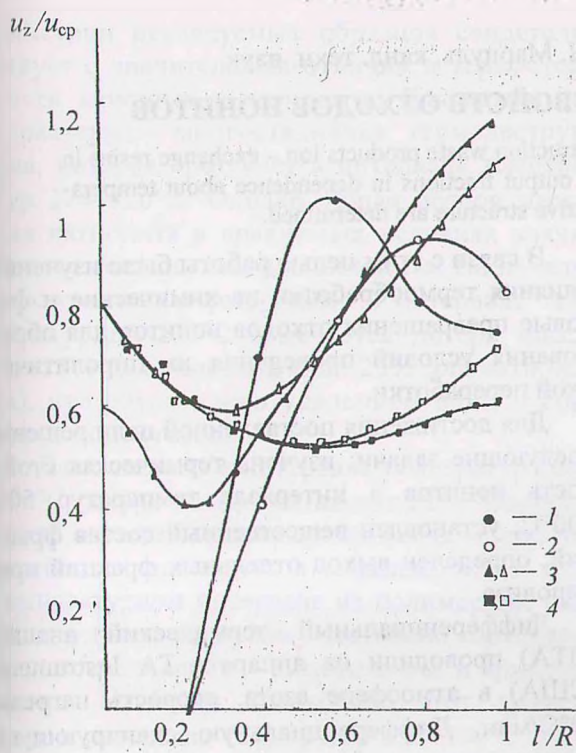
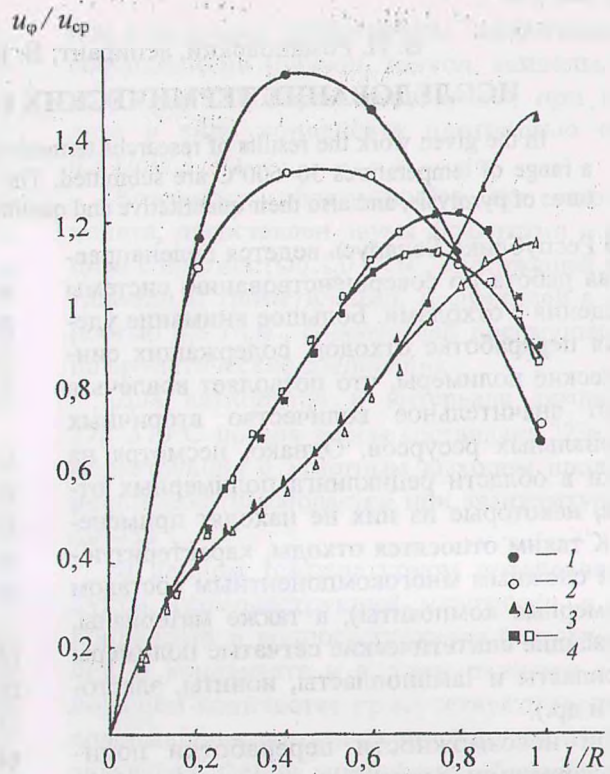


Рис. 4. Изменение профиля осевой (а) и тангенциальной (б) скорости по радиусу и длине трубы (лопастный завихритель,  $\alpha = 30^\circ$ ):  
1 —  $l/D = 0,5$ ; 2 —  $2,5$ ; 3 —  $4,5$ ; 4 —  $8,5$ ; 5 —  $13,5$ ; 6 —  $19,5$



а



б

Рис. 5. Изменение профиля осевой (а) и тангенциальной (б) скорости по радиусу и длине трубы: тангенциальный завихритель ( $F_{np}/F_{tp} = 0,872$ ): 1 -  $l/D = 1$ ; 2 -  $l/D = 4$ ; шнековый завихритель ( $l/D = 0,875$  и  $1,56$ ): 3 -  $l/D = 1$ ; 4 -  $l/D = 4$ .

Таким образом, сравнительными экспериментальными исследованиями нами установлено влияние на структуру потока конструкций статических закручивателей с различными геометрическими параметрами, но с примерно одинаковым их гидравлическим сопротивлением. Согласно опытным данным, предпочтительнее многолопастный закручиватель, обеспечивающий максимальное значение осевых скоростей у поверхности стенки, т. е. в зоне контакта фаз, и их более стабильный профиль по длине канала.

### Литература

1. Шукин В. К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. — М.: Машиностроение, 1970. — 330 с.
2. Ершов А. И. Разработка, исследование и применение элементарных ступеней контакта с взаимодействием фаз в закрученном прямо-

ке: Дис. ... докт. техн. наук: 05.17.08. — Л., 1975. — 301 с.

3. А.с. 182108 СССР, Кл. 12а, 5. Массообменный аппарат для взаимодействия газа с жидкостью. — 1966.

4. А.с. 257499 СССР, Кл. 12а, 5. Контактная тарелка. — 1969.

5. А.с. 724150 СССР, Кл. В 01D 3/26. Массообменный аппарат. — 1979.

6. А.с. 481291 СССР, Кл. В 01D 3/30. Массообменный аппарат. — 1975.

7. А.с. 1697323 СССР, Кл. В 01D 3/30. Контактное устройство для теплообменных колонн. — 1991.

8. Собин В. М. Исследование гидродинамических характеристик одно- и двухфазного закрученного потока в контактных элементах. Дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. — Мн., 1972. — 130 с.

9. Дементьев Б. А. и др. Исследование сепарационного устройства с подводом газожидкостной среды // Теплоэнергетика. — № 3. — 1972. — С. 25–29.